



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MODELO DE EXPANSIÓN DE LOS
SECTORES ELÉCTRICO Y TRANSPORTE:
ANÁLISIS DEL ROL DEL VEHÍCULO DE
HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA DE IBERIA**

Javier Mahou Luque

Directores:

José Villar Collado

Fco. Alberto Campos Fernández

Rosendo Castañón Naseiro

Madrid

Agosto de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Modelo de expansión de los sectores eléctrico y transporte: Análisis del rol del vehículo de
hidrógeno en la transición energética en Iberia”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

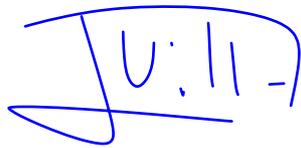
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Mahou Luque

Fecha: 29/08/2022

Autorizada la entrega del proyecto
LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: José Villar Collado

Fecha: 29/08/2022

Fdo.: Fco. Alberto Campos Fernández Fecha: 29/08/2022



Fdo.: Rosendo Castañón Naseiro

Fecha: 29/08/2022

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Javier Mahou Luque DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Modelo de expansión de los sectores eléctrico y transporte: Análisis del rol del vehículo de hidrógeno en la transición energética en Iberia”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 29 de agosto de 2022.

ACEPTA

Fdo.: Javier Mahou Luque

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MODELO DE EXPANSIÓN DE LOS
SECTORES ELÉCTRICO Y TRANSPORTE:
ANÁLISIS DEL ROL DEL VEHÍCULO DE
HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA DE IBERIA**

Javier Mahou Luque

Directores:

José Villar Collado

Fco. Alberto Campos Fernández

Rosendo Castañón Naseiro

Madrid

Agosto de 2022

MODELO DE EXPANSIÓN DE LOS SECTORES ELÉCTRICO Y TRANSPORTE: ANÁLISIS DEL ROL DEL VEHÍCULO DE HIDRÓGENO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN IBERIA

Autor: Mahou Luque, Javier.

Directores: Villar Collado, José; Campos Fernández, Francisco Alberto; Castañón Naseiro, Rosendo Daniel.

Entidades Colaboradoras: Instituto de Investigación Tecnológica (IIT, ICAI – Universidad Pontificia Comillas); Institute of Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC TEC).

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Vehículo eléctrico, vehículo de hidrógeno, sector de hidrógeno, emisiones de CO₂, precio de la electricidad, transición energética.

1. Acrónimos

Acrónimo	Definición
ICEV	Vehículo con motor de combustión interna
BEV	Vehículo eléctrico de baterías
FCEV	Vehículo con pila de combustible (de hidrógeno)

Tabla 1. Nomenclatura de los acrónimos.

2. Introducción

Con motivo de poner freno al cambio climático, se han establecido nuevas normativas medioambientales en la Unión Europea, como la que limita las emisiones de CO₂ de los vehículos turismos y comerciales ligeros instaurada en 2019 [1], que han provocado que los fabricantes de automóviles hayan desplazado gran parte de su inversión en I+D hacia el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión libres de emisiones locales. Las dos opciones con mayor potencial que cumplen este requisito son BEV y FCEV, no obstante, a fecha de 2021, la penetración en España de BEV (2% [2]) y de FCEV (~ 0% [3]) es aún muy reducida.

Este trabajo busca proyectar la expansión de dichas tecnologías de propulsión en España y Portugal para el periodo 2022-2045, valorando sus costes de inversión, operación, mantenimiento y emisiones, y su implicación tanto en el sistema de generación eléctrica como en el de hidrógeno. Para ello, se proponen dos módulos: uno que simula el funcionamiento de los FCEV, y otro que simula la red de generación, almacenamiento y recarga de hidrógeno; los cuales se integran en CEVESA, que es un modelo de operación y expansión de la capacidad

del sistema eléctrico ibérico mediante una minimización holística de costes con detalle horario (compartido entre el IIT y el INESC TEC). CEVESA ya incluye otro módulo que modela la expansión del BEV y permite estimar la proporción entre estos y los ICEV [4], por ello, es también necesario compatibilizar este con los nuevos módulos.

3. Descripción del proyecto

El objetivo del trabajo es desarrollar en GAMS el problema de optimización a integrar en CEVESA, en el que se calcula la evolución combinada de BEV, de FCEV y de la capacidad de generación eléctrica, considerando las restricciones medioambientales impuestas por la Unión Europea [5]. No obstante, la predicción no busca ser exacta, sino ser una base sobre la que obtener conclusiones y tendencias concluyentes desde las que proponer soluciones al reto de la transición energética y de la movilidad.

Las principales hipótesis que se han tomado para reducir el tiempo de cálculo son:

- Se considera un mercado de competencia perfecta, esto es, sin oligopolios. Por tanto, el precio de mercado de la electricidad coincide con el coste marginal del sistema.
- La elección de un tipo de vehículo sobre otro solamente atiende a la de menor coste, no a preferencias del consumidor.
- Todos los vehículos de cada tipo de tecnología tienen el mismo precio, depósito y consumo, los cuales dependen del año.
- Se modela el sistema de hidrógeno con una única planta electrolizadora reversible y un único depósito de almacenamiento de hidrógeno.

- No se contabilizan los costes de expansión del electrolizador, del almacenamiento ni de la distribución.

La extensión propuesta de CEVESA se divide en dos partes diferenciadas, que modelan el sector del hidrógeno y del transporte de forma horaria. El modelo del sector del hidrógeno, basado en [6], abarca la producción del gas mediante electrolizadores, su almacenamiento, su demanda y la generación de electricidad a partir del hidrógeno almacenado por medio de la electrólisis inversa, con el planteamiento mostrado en la Figura I.

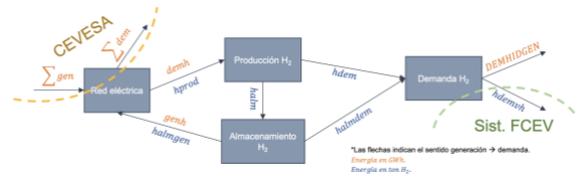


Figura I. Esquema de los flujos de energía del sector de hidrógeno.

El comportamiento del sector del transporte se modela bajo 21 tipos de flotas para cada país, cada una con un recorrido y utilización horaria propios [7]. Dentro de ellas, se ha simulado individualmente la evolución del nivel del depósito de cada FCEV, representando el repostaje de hidrógeno con la activación de la variable binaria *rep*, como se señala en la Figura II. Ha sido necesario hacer transformaciones mediante implicaciones, apoyándose en las Leyes de Morgan, para poder modelar de forma lineal el problema.

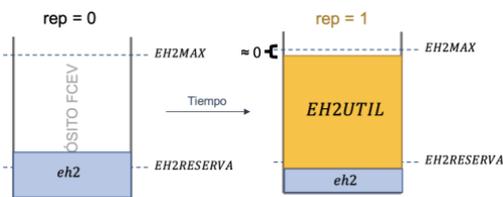


Figura II. Modelado del nivel de depósito de los FCEV.

4. Resultados

Se han desarrollado cuatro escenarios alternativos para probar la sensibilidad de los resultados a la variación de la evolución coste de adquisición de los BEV y FCEV, el cual es el parámetro con mayor incertidumbre y peso en los resultados. El escenario EMP valora un crecimiento futuro en los costes de fabricación de las baterías y el DTH un desarrollo tardío de la red de hidrogeneras en el país.

La Figura III y la Figura IV muestran los resultados de la evolución de la penetración de ICEV, BEV y

FCEV, representados por áreas, en los cuatro escenarios para España y Portugal, respectivamente.

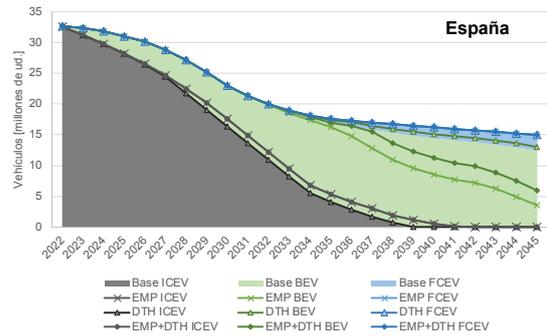


Figura III. Evolución del parque móvil en España.

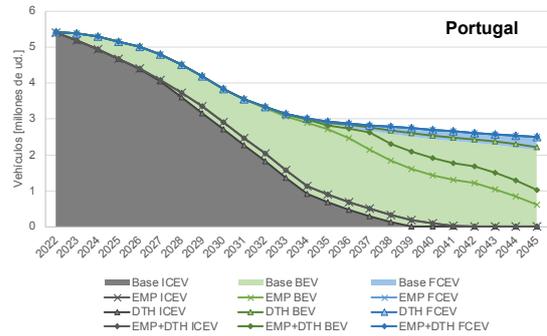


Figura IV. Evolución del parque móvil en Portugal.

Los resultados muestran baja variabilidad entre escenarios en el periodo 2022-2035 y alta variabilidad en 2035-2045, debida a la mayor incertidumbre a causa de la irrupción de los FCEV y de la distancia en el tiempo con la actualidad. Según el modelo, dicha irrupción se dará entre 2032 y 2035, y su velocidad dependerá esencialmente de disponibilidad de las materias primas necesarias para las baterías de los BEV y del tipo de uso de los vehículos. Tras analizar independientemente cada flota, se ha comprobado que en flotas con usos eminentemente nocturnos o de largo recorrido los FCEV tendrán un despliegue más veloz.

Todos los escenarios y flotas presentan una fuerte disminución de la cuota de los ICEV a partir de 2022 en favor de los BEV, los cuales alcanzarán un pico de ventas entre 2028 y 2032. El progresivo aumento del coste de fabricación de los ICEV, debido al endurecimiento de sus límites de emisiones, motivará su desaparición, lo que conllevará a una reducción de emisiones totales en los sistemas eléctrico y transporte del 90% en 2040, consiguiendo cumplir los objetivos de emisiones impuestos por la Unión Europea [5] sin necesidad de nuevas limitaciones, bajo las hipótesis tomadas.

Se ha descubierto que en todos los escenarios en los que la presencia de FCEV es superior, el precio de la electricidad es menor gracias a la flexibilidad que otorga el almacenaje de hidrógeno, que permite producir al máximo en las horas valle consiguiendo dos objetivos: generar hidrógeno en las horas más baratas y aplanar la demanda eléctrica optimizando su generación.

5. Conclusiones

Del modelo se han extraído siete conclusiones principales, considerando las hipótesis realizadas:

1. Los FCEV tendrán una importante cuota de mercado a partir de 2035.
2. Una alta penetración de los FCEV reduce el coste de la electricidad y las emisiones en su generación.
3. La velocidad de despliegue de los FCEV depende en gran medida del suministro de materias primas para las baterías.
4. El tipo de uso de los vehículos será un factor importante en la decisión de compra entre BEV o FCEV.
5. Es posible alcanzar los objetivos de emisiones de CO₂ de la UE en España y Portugal.
6. El despliegue de BEV y FCEV será similar en España y Portugal en términos relativos.
7. El modelo propone acelerar la sustitución de ICEV por BEV desde el momento actual.

El modelo propuesto tiene potencial para convertirse en una herramienta para evaluar el impacto de políticas reguladoras y de subvenciones en la transición hacia la movilidad eléctrica en España y Portugal. Para poder llegar a serlo, proyectos futuros deberían profundizar en:

- Incluir la consideración de tecnologías híbridas de propulsión, de gas y la discriminación de motores diésel y gasolina.
- Posibilitar el uso de e-fuels por los ICEV y modelar su sistema de generación.
- Valorar el coste de expansión de las hidrogeneras y su impacto en las ventas de FCEV.
- Calcular las emisiones en la fabricación de los vehículos según su tecnología de propulsión.
- Modelizar aspectos sociales y culturales sobre la compra de vehículos y la reticencia a nuevas tecnologías.

6. Referencias

[1] *Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de abril de 2019,*

por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, y por el que se derogan los Reglamentos (CE) n.º 443/2009 y (UE) n.º 510/2011 (Texto pertinente a efectos del EEE.), vol. 111. 2019. Accedido: 16 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj/spa>

- [2] elEconomista.es, «El coche eléctrico llega solo al 2%, tres veces menos que en Europa». <https://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/11364986/08/21/El-coche-electrico-llega-solo-al-2-tres-veces-menos-que-en-Europa.html> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [3] E. Martín, «En España solo hay 15 coches de hidrógeno y ni una hidrogenera pública: estas son las medidas que proponen para cambiarlo», *Motorpasion*, 27 de octubre de 2021. <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/espana-solo-hay-15-coches-hidrogeno-hidrogenera-publica-estas-medidas-que-proponen-para-cambiarlo> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [4] R. Castanon, F. A. C. Fernandez, S. D. Martinez, y J. V. Collado, «An Electricity Generation Expansion Model with ICEV and PEV Investments», presentado en 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), jun. 2018. doi: 10.1109/EEM.2018.8469772.
- [5] «Greenhouse gas emission statistics - emission inventories». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories (accedido 17 de agosto de 2022).
- [6] B. Álvarez y A. María, «Impact of the hydrogen economy on the electricity sector», 2021, Accedido: 14 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/47790>
- [7] J. Villar, I. Trigo, C. A. Díaz, y P. Gonzalez, «Cost-benefit analysis of plug-in electric vehicles penetration», en *2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, may 2013, pp. 1-8. doi: 10.1109/EEM.2013.6607287.

EXPANSION MODEL OF THE ELECTRIC AND TRANSPORT SECTORS: ANALYSIS OF THE ROLE OF THE HYDROGEN VEHICLE IN THE ENERGY TRANSITION IN IBERIA

Author: Mahou Luque, Javier.

Supervisors: Villar Collado, José; Campos Fernández, Francisco Alberto; Castañón Naseiro, Rosendo Daniel.

Collaborating Entities: Instituto de Investigación Tecnológica (IIT, ICAI – Universidad Pontificia Comillas); Institute of Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC TEC).

ABSTRACT

Keywords: Electric vehicle, hydrogen vehicle, hydrogen sector, CO₂ emissions, electricity price, energy transition.

1. Acronyms

Acronym	Definition
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
FCEV	Fuel-Cell Electric Vehicle (hydrogen vehicle)

Table 1. Nomenclature of acronyms.

2. Introduction

In order to curb climate change, new environmental regulations have been introduced in the European Union, such as the one limiting CO₂ emissions from passenger cars and light commercial vehicles in 2019 [1], which have led car manufacturers to shift much of their R&D investment towards the development of new local-emission-free propulsion technologies. The two options with the greatest potential that meet this requirement are BEVs and FCEVs, however, as of 2021, the penetration of BEVs (2% [2]) and FCEVs (~0% [3]) in Spain was still very low.

This work seeks to project the expansion of these propulsion technologies in Spain and Portugal for the period 2022-2045, assessing their investment, operation, maintenance and emissions costs, and their involvement in both the electricity generation system and the hydrogen system. To this end, two modules are proposed: one that simulates the operation of the FCEVs, and another that simulates the hydrogen generation, storage and recharging network; both of which are integrated into CEVESA, which is a model for the operation and expansion of the Iberian electricity system capacity through a holistic minimisation of costs with hourly detail (shared between IIT and INESC TEC). CEVESA already includes another module that models the expansion

of battery electric vehicles and allows estimating the ratio between BEV and ICEV [4], so it is also necessary to make it compatible with the new modules.

3. Project description

The aim of this project is to develop in GAMS the optimisation problem to be integrated in CEVESA, in which the combined evolution of BEV, FCEV and electricity generation capacity is calculated, considering the environmental restrictions imposed by the European Union [5]. However, the prediction does not seek to be exact, but rather to be a basis on which to draw conclusions and conclusive trends from which to propose solutions to the challenge of the energy and mobility transition.

The main assumptions that have been made to reduce the calculation time are:

- A perfect competition market is considered, i.e. without oligopolies. Therefore, the market price of electricity coincides with the marginal cost of the system.
- The choice of one type of vehicle over another is only based on the lowest cost, not on consumer preferences.
- All vehicles of each type of technology have the same price, tank and consumption, which depend on the year.
- The hydrogen system is modelled with a single reversible electrolyser plant and a single hydrogen storage tank.
- The investment costs for the electrolyser, storage and distribution are not accounted for.

CEVESA's proposed extension is divided into two distinct parts, modelling the hydrogen and transport

sector on an hourly basis. The hydrogen sector model, based on [6], covers the production of the gas by electrolyzers, its storage, its demand and the generation of electricity from the stored hydrogen by means of reverse electrolysis, with the approach shown in Figure I.

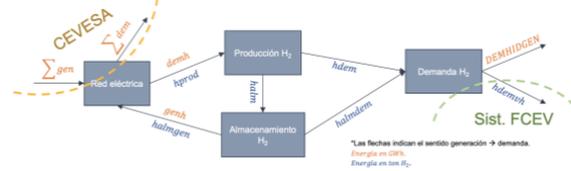


Figure I. Diagram of energy flows in the hydrogen sector.

The behaviour of the transport sector is modelled under 21 fleet types for each country, each with its own route and hourly usage [7]. Within them, the evolution of the tank level of each FCEV has been simulated individually, representing hydrogen refuelling with the activation of the binary variable rep , as shown in Figure II. It has been necessary to make transformations by means of implications, based on Morgan's Laws, in order to linearise the problem.

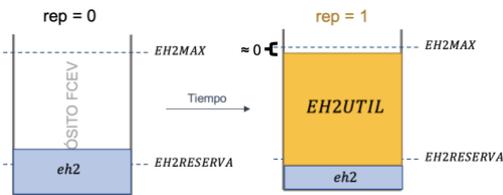


Figure II. Modelling of the level of deposition of FCEVs.

4. Results

Four alternative scenarios have been developed to test the sensitivity of the results to the variation in the evolution of BEV and FCEV acquisition costs, which is the parameter with the greatest uncertainty and weight in the results. The EMP scenario assesses a future growth in battery manufacturing costs and the DTH scenario a late development of the hydrogen network in the country.

Figure III and Figure IV show the results of the evolution of ICEV, BEV and FCEV penetration, represented by areas, in the four scenarios for Spain and Portugal, respectively.

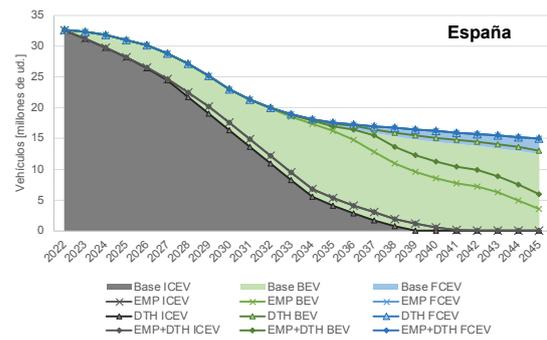


Figure III. Evolution of the vehicle fleet in Spain.

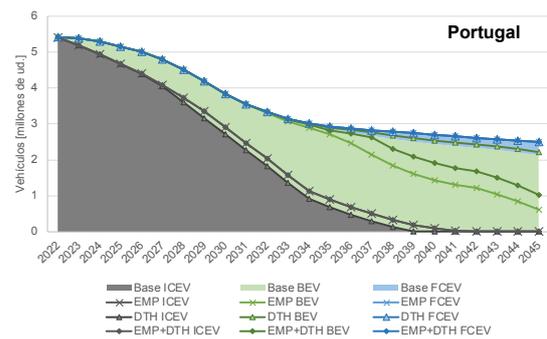


Figure IV. Evolution of the vehicle fleet in Portugal.

The results show low variability between scenarios in the period 2022-2035 and high variability in the period 2035-2045, due to the higher uncertainty caused by the introduction of FCEVs and the distance in time from today. According to the model, this breakthrough will occur between 2032 and 2035, and its speed will depend essentially on the availability of the raw materials needed for BEV batteries and the type of vehicle use. After analysing each fleet independently, it has been found that in fleets with predominantly night-time or long-distance use, FCEVs will be deployed more quickly.

All scenarios and fleets show a sharp decline in the share of ICEVs from 2022 in favour of BEVs, which will reach peak sales between 2028 and 2032. The progressive increase in the cost of manufacturing ICEVs, due to the tightening of their emission limits, will motivate their disappearance, leading to a 90% reduction in total emissions in the electricity and transport systems in 2040, achieving the emission targets imposed by the European Union [5] without the need for new limitations, under the assumptions made.

It has been found that in all scenarios in which the presence of FCEV is higher, the price of electricity is lower thanks to the flexibility provided by hydrogen storage, which allows maximum production during off-peak hours, achieving two objectives: generating

hydrogen during the cheapest hours and flattening electricity demand by optimising its generation.

5. Conclusions

Seven main conclusions have been drawn from the model, taking into account the hypotheses made:

1. FCEVs will have a significant market share from 2035.
2. A high penetration of FCEVs reduces the cost of electricity and emissions in its generation.
3. The speed of deployment of FCEVs is highly dependent on the supply of raw materials for batteries.
4. The type of use of the vehicles will be an important factor in the purchase decision between BEV or FCEV.
5. It is possible to achieve the EU's CO₂ emission targets in Spain and Portugal.
6. The deployment of BEVs and FCEVs will be similar in Spain and Portugal in relative terms.
7. The model proposes to accelerate the replacement of ICEVs by BEVs from now on.

The proposed model has the potential to become a tool to assess the impact of regulatory and subsidy policies on the transition to electric mobility in Spain and Portugal. In order to become such a tool, future projects should go further:

- To include the consideration of hybrid propulsion technologies, gas and the discrimination of diesel and petrol engines.
- To enable the use of e-fuels by ICEVs and modelling their generation system.
- To assess the cost of expanding hydropower plants and their impact on ICEV sales.
- To calculate emissions in the manufacture of vehicles according to their propulsion technology.
- To model social and cultural aspects of vehicle purchase and reluctance to new technologies.

6. References

[1] Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de abril de 2019, por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, y por el que se

derogan los Reglamentos (CE) n.º 443/2009 y (UE) n.º 510/2011 (Texto pertinente a efectos del EEE.), vol. 111. 2019. Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj/spa>

- [2] elEconomista.es, 'El coche eléctrico llega solo al 2%, tres veces menos que en Europa'. <https://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/11364986/08/21/El-coche-electrico-llega-solo-al-2-tres-veces-menos-que-en-Europa.html> (accessed Dec. 03, 2021).
- [3] E. Martín, 'En España solo hay 15 coches de hidrógeno y ni una hidrogenera pública: estas son las medidas que proponen para cambiarlo', *Motorpasión*, Oct. 27, 2021. <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/espana-solo-hay-15-coches-hidrogeno-hidrogenera-publica-estas-medidas-que-proponen-para-cambiarlo> (accessed Dec. 03, 2021).
- [4] R. Castanon, F. A. C. Fernandez, S. D. Martinez, and J. V. Collado, 'An Electricity Generation Expansion Model with ICEV and PEV Investments', presented at the 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), Jun. 2018. doi: 10.1109/EEM.2018.8469772.
- [5] 'Greenhouse gas emission statistics - emission inventories'. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories (accessed Aug. 17, 2022).
- [6] B. Álvarez and A. María, 'Impact of the hydrogen economy on the electricity sector', 2021, Accessed: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/47790>
- [7] J. Villar, I. Trigo, C. A. Díaz, and P. Gonzalez, 'Cost-benefit analysis of plug-in electric vehicles penetration', in 2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM), May 2013, pp. 1–8. doi: 10.1109/EEM.2013.6607287.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado de la cuestión	3
1.2.1. Contexto	3
1.2.2. CEVESA	8
1.2.3. Otros modelos	11
1.3. Justificación del trabajo	14
2. Definición del trabajo	16
2.1. Definición del trabajo	16
2.2. Objetivos	17
2.3. Metodología	17
2.4. Planificación y estimación económica	19
2.4.1. Recursos empleados	19
2.4.2. Valoración económica	20
2.5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	21
3. Modelado	23
3.1. Hipótesis de modelado	23
3.1.1. Hipótesis de modelado del sistema eléctrico	23
3.1.2. Hipótesis de modelado del sistema de hidrógeno	23
3.1.3. Hipótesis de modelado del sistema transporte	24
3.2. Planteamiento y flujograma	24
3.3. Nomenclatura	27
3.4. Función objetivo	30
3.4.1. Costes asociados al sector eléctrico	30
3.4.2. Costes asociados al sector hidrógeno	31

3.4.3.	Costes asociados al sector transporte	31
3.5.	Restricciones	32
3.5.1.	Restricciones relacionadas con el sistema de hidrógeno	32
3.5.2.	Restricciones relacionadas con el sistema transporte FCEV	33
3.5.3.	Otras restricciones.....	35
4.	Datos de entrada	37
4.1.	Costes de los vehículos	37
4.1.1.	Datos históricos.....	37
4.1.2.	Coste de inversión.....	38
4.1.3.	Coste de mantenimiento.....	40
4.1.4.	Coste de operación.....	40
4.2.	Patrones de uso de los vehículos.....	44
4.3.	Evolución del parque de vehículos	45
4.4.	Escenarios alternativos.....	46
4.4.1.	Escenario con escasez de materias primas para las baterías (EMP)	47
4.4.2.	Escenario con desarrollo tardío de la red de hidrogeneras (DTH).....	48
5.	Resultados.....	50
5.1.	Evolución del parque de vehículos	50
5.1.1.	Evolución del parque de vehículos por flotas	54
5.2.	Emisiones de CO ₂	57
5.2.1.	Emisiones globales de CO ₂	57
5.2.2.	Emisiones de CO ₂ en la generación de electricidad.....	58
5.3.	Precio de la electricidad	60
6.	Conclusiones.....	63
7.	Bibliografía.....	66
8.	Anexos.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del estado del arte.	15
Tabla 2. Cronograma del proyecto.....	18
Tabla 3. Coste de los recursos económicos utilizados.....	20
Tabla 4. Nomenclatura de los índices.....	27
Tabla 5. Nomenclatura de los parámetros exógenos.....	28
Tabla 6. Nomenclatura de los parámetros exógenos (cont.).....	28
Tabla 7. Nomenclatura de los parámetros auxiliares.....	29
Tabla 8. Nomenclatura de las variables endógenas.....	29
Tabla 9. Datos históricos de ventas de ICEV y BEV en España [20], [54, p. 77], [55].	37
Tabla 10. Datos técnicos de FCEV [56], [57], [58], [59].	38
Tabla 11. Datos históricos técnicos de FCEV en España [56], [57], [58].	38
Tabla 12. Coste anual de mantenimiento de los vehículos [43], [63].	40
Tabla 13. Utilización de las flotas de vehículos [42].	44
Tabla 14. Evolución del parque de vehículos en el escenario base en España.....	74
Tabla 15. Evolución del parque de vehículos en el escenario base en Portugal.....	75
Tabla 16. Evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en España.....	76
Tabla 17. Evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en Portugal.....	77
Tabla 18. Evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en España.....	78
Tabla 19. Evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en Portugal.....	79
Tabla 20. Evolución del parque de vehículos en escenario EMP+DTH en España.....	80
Tabla 21. Evolución del parque de vehículos en escenario EMP+DTH en Portugal.....	81
Tabla 22. Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en España.....	82
Tabla 23. Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en Portugal.....	83
Tabla 24. Evolución de los precios de la electricidad en España.....	84
Tabla 25. Evolución de los precios de la electricidad en Portugal.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reconstrucciones regionales de temperatura media [15].	4
Figura 2. Evolución de matriculaciones de ZEV en España y Portugal [19].	5
Figuras 3 y 4. Grupo motopropulsor de FCEV (izquierda) y BEV (derecha).	6
Figura 5. Penetración de turismos según tecnología en Europa para el periodo 2015 – 2050 [48].	13
Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el proyecto [51].	22
Figura 7. Esquema de los flujos de energía del sector de hidrógeno.	25
Figura 8. Esquema de los flujos de energía del sector transporte FCEV.	26
Figura 9. Modelado del nivel de depósito de los FCEV.	26
Figura 10. Evolución de precios de venta de los vehículos sin IVA [20], [54, p. 77], [55], [56], [57], [58].	39
Figura 11. Evolución del consumo de los FCEV [56], [57], [58], [59].	41
Figura 12. Evolución de la capacidad de depósito de los FCEV [56], [57], [58], [59].	42
Figura 13. Evolución de la capacidad útil de depósito de los FCEV [56], [57], [58], [59].	43
Figura 14. Evolución de la autonomía de los FCEV [56], [57], [58], [59].	43
Figura 15. Previsión del parque total de vehículos [43], [19].	45
Figura 16. Antigüedad media del parque de vehículos en España [64].	45
Figura 17. Evolución de precios de venta de los vehículos (escenario EMP) [66].	48
Figura 18. Evolución de precios de venta de los vehículos (escenario DTH).	49
Figura 19. Evolución del parque móvil en España (escenario base).	50
Figura 20. Evolución del parque móvil en Portugal (escenario base).	50
Figura 21. Evolución del parque móvil en España.	52
Figura 22. Evolución del parque móvil en Portugal.	52
Figura 23. Evolución de la flota TaxN50% en España.	54
Figura 24. Evolución de la flota TaxN50% en Portugal.	55
Figura 25. Evolución de la flota T1.1 en España.	56
Figura 26. Evolución de la flota T1.1 en Portugal.	56
Figura 27. Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en España.	57
Figura 28. Evolución de las emisiones totales de CO ₂ en Portugal.	58
Figura 29. Evolución de las emisiones de CO ₂ por producción eléctrica en España.	59
Figura 30. Evolución de las emisiones de CO ₂ por producción eléctrica en Portugal.	59

Figura 33. Evolución del precio de la electricidad en España.	61
Figura 34. Evolución del precio de la electricidad en Portugal.	61

1. INTRODUCCIÓN

En este apartado, primero, se exponen los motivos por los que este trabajo ha sido llevado a cabo y, después, se revisa la literatura actual relacionada con su temática para poder encuadrarlo dentro de ella. Por último, se señalan los avances del trabajo con respecto a la literatura revisada.

1.1. Motivación

Nuevas normativas europeas, como la que limita las emisiones de CO₂ de los vehículos turismos y comerciales ligeros establecida en 2019 [1], han provocado que los fabricantes de automóviles hayan desplazado gran parte de su inversión en I+D hacia el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión. Volkswagen [2], Stellantis [3], Renault [4], Daimler [5] y BMW [6], entre otros, han anunciado en 2021 inversiones de más de 80.000 millones de euros en el desarrollo de Vehículos Eléctricos de Baterías (BEV, por sus siglas en inglés). También, en 2021, Toyota [7], Hyundai [8], Honda y General Motors [9], entre otros, han comunicado una nueva inversión de capital en la investigación de Vehículos Eléctricos de Pila de Combustible (FCEV).

No obstante, a fecha de 2021, la penetración en España de BEV (2 % [10]) y de FCEV (~ 0 % [11]) es muy reducida. Este trabajo busca proyectar la expansión de dichas tecnologías de propulsión en España y Portugal para el periodo 2022-2045, valorando sus costes de inversión, operación, mantenimiento y emisiones, y la implicación que tiene su despliegue tanto en el sistema de generación eléctrica como en el de hidrógeno. Se ha utilizado CEVESA, un modelo de operación y expansión de la capacidad del sistema eléctrico ibérico con detalle horario (compartido entre el IIT y el INESC TEC), que ya incluye un módulo que modela la expansión de BEV que permite estimar la proporción entre estos vehículos y los ICEV, incluyendo la expansión de la capacidad de generación eléctrica necesaria para responder a la demanda eléctrica esperada, dependiendo de los escenarios considerados.

Ese módulo tiene como principales parámetros exógenos:

1. los costes de inversión, operación y mantenimiento de los vehículos,



2. las políticas medioambientales estatales y europeas [1], [12], [13], [14], y
3. diferentes perfiles de uso del automóvil según necesidades de movilidad.

Con el objetivo de cumplir las políticas [1], [12], [13], actualmente las marcas automovilísticas tienen gran interés en el crecimiento de las ventas de vehículos cero emisiones. Sin embargo, una alta penetración de dichos vehículos (BEV y FCEV) implica un incremento notable en la demanda eléctrica, lo que podría tener consecuencias relevantes en la estructura de generación eléctrica. La ventaja de los FCEV reside en que el hidrógeno que utilizan, aun consumiendo electricidad en su fabricación, tiene flexibilidad para generarse en los momentos de menor coste para la red de generación eléctrica gracias a la posibilidad de almacenarlo. En cambio, la decisión de recarga de los BEV la toman los conductores según sus hábitos de movilidad, por lo cual esta demanda eléctrica no tiene porqué darse en los momentos óptimos para la red.

El hecho de que se pueda almacenar el hidrógeno entre su generación (idealmente como hidrógeno verde, es decir, consumiendo electricidad generada con energía renovable) y la recarga de los FCEV, posibilita que puedan utilizarse, por ejemplo y entre otros, los excedentes de energía renovable para la recarga de estos vehículos, las cuales son considerablemente más rápidas que las de los BEV (véase sección 1.2.1.1 y 1.2.1.2).

Por otro lado, actualmente existe incertidumbre sobre la capacidad de intensificar la obtención del litio en los próximos años a causa del incremento exponencial de su demanda. Hay estudios que señalan que aún no está planeada la apertura de suficientes minas como para poder abarcar la demanda prevista para 2030. El despliegue de los FCEV por encima de los BEV ayudaría a la reducción de la dependencia de este material, básico para la fabricación de las baterías, gracias al menor tamaño de sus baterías.

La misión de la batería en un FCEV no es acumular toda la energía necesaria para el movimiento, sino funcionar como *buffer* entre la pila de combustible y el motor eléctrico para que el conductor pueda modular su par con el acelerador. Por tanto, la autonomía de los FCEV no depende del tamaño de su batería, sino del tamaño de su depósito de hidrógeno. Por ello, es más sencillo, barato y ligero alcanzar autonomías superiores en los FCEV, lo cual es otra ventaja a su favor. En su contra, por ahora, el coste del hidrógeno, que se espera que baje progresivamente los próximos años.

En conclusión, la tecnología FCEV tiene potencial para poder optimizar el sistema eléctrico-transporte a la vez que representar una alternativa con un modo de uso similar al de los vehículos de combustión interna (ICEV), el cual puede resultar a los conductores más atractivo que el de los BEV.

El objetivo final de este trabajo es estimar sendas de evolución de las diferentes tecnologías de propulsión de los vehículos y de la capacidad de generación eléctrica necesaria, ante distintos escenarios de costes de adquisición de los vehículos, mediante una minimización de los costes del sistema eléctrico, de hidrógeno y del transporte, con un enfoque centralizado y siguiendo el límite de emisiones marcado por la Unión Europea [14]. También, se ha analizado la alineación de los objetivos de emisiones de la Unión Europea con la realidad económica, tecnológica y social de España y Portugal, y el impacto en el precio de la electricidad que puede tener el despliegue de una u otra tecnología.

1.2. Estado de la cuestión

En esta sección, se hace, primero, una presentación del contexto actual de la movilidad y de las diferentes alternativas para el futuro. Después, se introduce el modelo utilizado y ampliado en este trabajo (CEVESA) y, más tarde, se lleva a cabo una revisión de otras publicaciones con objetivos similares para comprender cuál es el estado actual del problema a abordar.

1.2.1. Contexto

La Revolución Industrial (1750-1840) supuso una transformación tecnológica, económica y social por la mecanización de la industria, en la que se utilizaron combustibles fósiles como principal fuente de energía. Los gases y partículas nocivas emitidos en estas combustiones han empeorado la calidad del aire y de la atmósfera del planeta. Uno de los efectos que provoca esta contaminación es el aumento de la temperatura media de la Tierra; de hecho, en Europa, la temperatura media del aire ha crecido más de 1 °C desde 1800 [15]. En la Figura 1 puede comprobarse como todas las regiones del planeta han sufrido un aumento de temperatura coincidiendo con el inicio de la industrialización, a excepción de la Antártida.



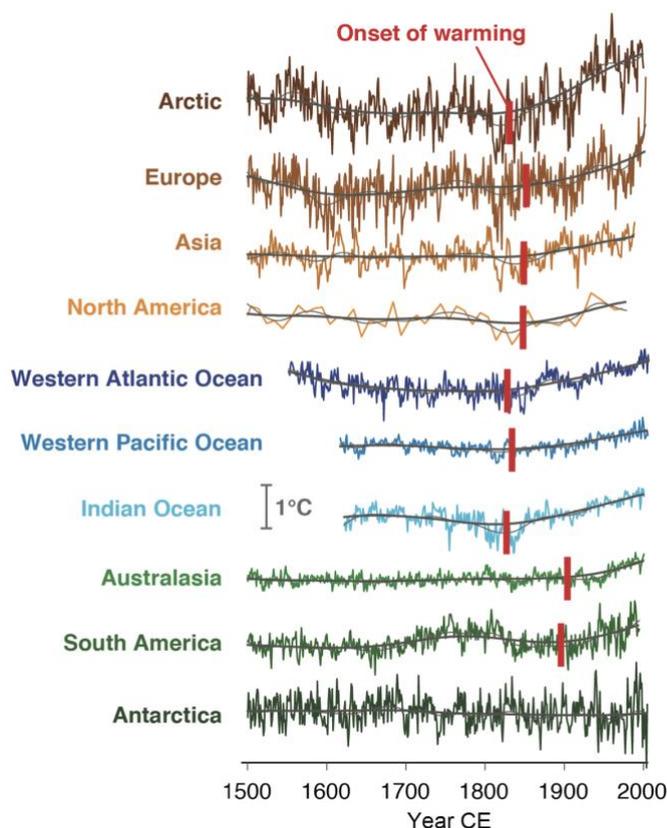


Figura 1. Reconstrucciones regionales de temperatura media [15].

El incremento de la temperatura media no es la única consecuencia de la contaminación del aire, ya que también puede causar enfermedades respiratorias, cáncer de pulmón, cardiopatías o accidentes cerebrovasculares [16]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cada año mueren prematuramente alrededor de 7 millones de personas a causa de este tipo de contaminación [16].

Para combatir este problema, el Gobierno de España, el Gobierno de Portugal y la Unión Europea están imponiendo e impulsando nuevas medidas, entre las cuales está el promover la reducción de emisiones de los parques móviles ([17], [18] y [1], respectivamente) mediante el impulso a las ventas de los vehículos cero emisiones (ZEV), entre los que se encuentran los BEV y FCEV. Tal y como se puede comprobar en la Figura 2, en los dos últimos años las matriculaciones de ZEV se han multiplicado por 2,4 en España y por 1,9 en Portugal [19].

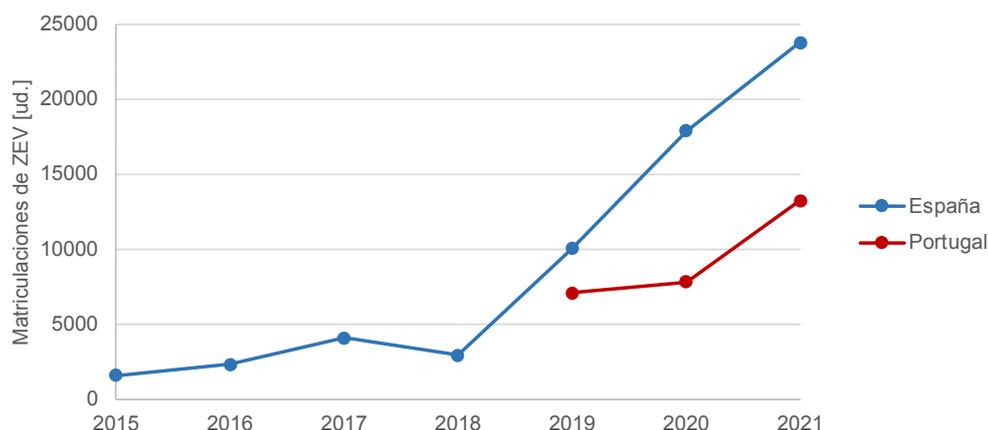


Figura 2. Evolución de matriculaciones de ZEV en España y Portugal [19].

En las secciones 1.2.1.1, 1.2.1.2 y 1.2.1.3 se exponen cuáles son las tecnologías con mayor potencial para conseguir una movilidad neutra en emisiones de carbono.

1.2.1.1. Vehículos eléctricos de baterías (BEV)

Los vehículos eléctricos de baterías son la alternativa con el mayor estado de desarrollo en la actualidad. Sus ventas ya son significativas dentro del total de España y Portugal, alcanzando en junio de 2022 una cuota de mercado del 3,48% [20] y del 10,65% [21], respectivamente.

El sistema de propulsión de los BEV tiene cuatro elementos principales:

- Una batería de gran capacidad, comúnmente de ion-litio por su superior densidad energética.
- Uno o varios motores eléctricos.
- Un sistema de recuperación de energía en la frenada, capaz de recargar parcialmente la batería para conseguir mayor autonomía.
- Una toma de corriente a través de la cual se conecta el vehículo a la red eléctrica, que es la principal forma de carga de la batería.

Las principales desventajas de los BEV son, primero, su necesidad de montar baterías de gran formato con componentes muy contaminantes en su fabricación y reciclado y, segundo, el tiempo necesario para su recarga. Por ejemplo, el BEV con mayor autonomía en venta, el Mercedes-EQ EQS 450+, puede recorrer entre cargas 743 km según la homologación europea WLTP, pero necesita una batería de 108 kWh que pesa alrededor de

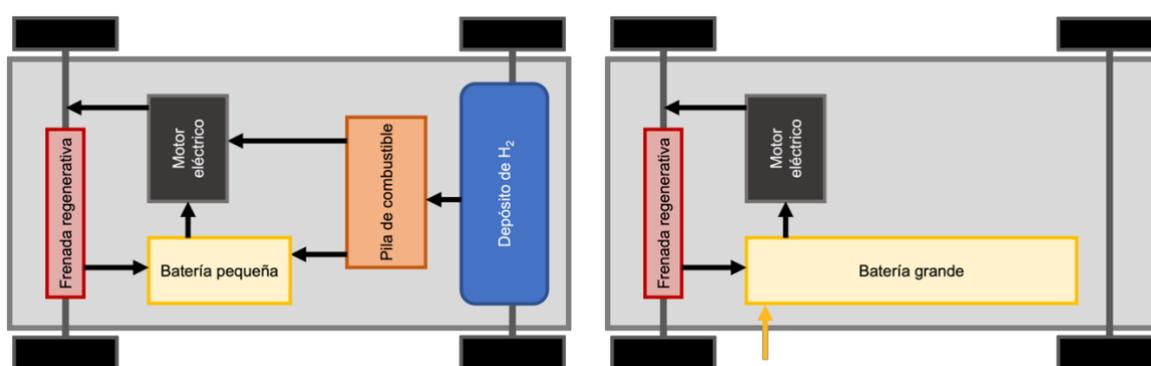
500 kg [22] y que tarda aproximadamente 1 hora en recargarse por completo en un cargador ultrarrápido de 150 kW [23] [24].

La aparición de las baterías de estado sólido, aún en desarrollo, podría poner fin a estos problemas. Por ello, las marcas están invirtiendo en *start-ups* que están investigando en esta tecnología, como Mercedes-Benz en ProLogium (2022) [25], Mercedes-Benz y Stellantis en Factorial Energy (2021) [26], BMW en Solid Power (2021) [27] y Volkswagen en QuantumScape (2018) [28]. Se considera 2030 como el horizonte temporal en el cual estas baterías estarán disponibles al público [29].

1.2.1.2. Vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV)

Los FCEV aún se encuentran en una fase prematura de desarrollo. Aunque en la Península se comenzaron a comercializar en 2015 con el Toyota Mirai de 1ª generación, en 2022 hay solo 19 unidades en circulación en España y 3 en Portugal [30]. Esto se debe, entre otros motivos, a la insuficiente red de repostaje de hidrógeno actual [31].

A fecha de julio de 2022, en la Península Ibérica solo hay una hidrogenera abierta al público (Zaragoza, España) y 9 privadas (8 en España y 1 en Portugal) [32]. Se prevé que antes de 2025 finalicen las obras de 6 hidrogeneras públicas en España y 1 en Portugal [32]. La velocidad del despliegue de la red de hidrogeneras será clave para la progresión de los FCEV en la Península Ibérica.



Figuras 3 y 4. Grupo motopropulsor de FCEV (izquierda) y BEV (derecha).

El funcionamiento del grupo motopropulsor de los FCEV es similar al de los BEV: son impulsados por un motor eléctrico que se alimenta de una batería más pequeña que la de los BEV, ya que esta sólo se utiliza como *buffer* entre el motor eléctrico y la pila de combustible. La batería, en lugar de cargarse a través de un enchufe a la red eléctrica, se

alimenta de la electricidad generada en la pila de combustible por la electrólisis del hidrógeno. Por tanto, la energía del FCEV se almacena en forma de hidrógeno, en depósitos con una capacidad de entre 5 y 7 kg. Además, al igual que en los BEV, la batería del FCEV también se recarga parcialmente mediante un sistema de recuperación de energía de frenado.

Los FCEV tienen dos desventajas principales. Por un lado, su grupo motopropulsor es más complejo y ocupa más espacio que el de los BEV, lo que hace que los FCEV sean más caros y grandes. Por otro lado, el hidrógeno es inflamable y se almacena a muy alta presión, por lo que el depósito debe estar fabricado a prueba de impactos muy severos porque, en caso de accidente, una rotura podría provocar una grave explosión. Este requisito de seguridad aumenta el coste del vehículo.

La mayor ventaja de los FCEV es la similitud de su uso con respecto a los ICEV. Su depósito de hidrógeno se puede repostar en 5 minutos [33] y pueden lograr autonomías comparables a los ICEV sin necesitar una batería grande y contaminante. En concreto, teniendo en cuenta que la tecnología de los FCEV está aún en fase prematura, el Hyundai NEXO (en venta desde 2018) es capaz de recorrer 666 km según el ciclo WLTP [34], una cifra equivalente a la de los BEV más capaces lanzados en 2022 [23]. En el futuro, se espera que los FCEV alcancen autonomías de hasta 1.000 km [35], de hecho, un Toyota Mirai de serie recorrió 1.003 km con una sola carga en junio de 2021 [36], aunque fue mediante la práctica del *hypermiling*¹.

1.2.1.3. Combustibles sintéticos o e-fuels

Además de con BEV y FCEV, también sería posible alcanzar una movilidad neutra en emisiones de carbono mediante los combustibles sintéticos, aptos para cualquier ICEV ya que pueden utilizarse como sustituto a los carburantes convencionales.

Los combustibles sintéticos se consiguen a partir de agua y CO₂, en un proceso en el que puede utilizarse únicamente energía de origen renovable. Su fabricación se divide en tres fases [38]:

¹ “Práctica de maximizar el ahorro de combustible de un vehículo de motor, especialmente mediante la técnica de conducción y el mantenimiento del vehículo” [37]

1. obtención del hidrógeno en un electrolizador a partir de la separación del hidrógeno y el oxígeno del agua, con la posibilidad de que la energía eléctrica empleada sea de origen 100% renovable,
2. captura del CO₂ a través del filtrado del aire,
3. combinación del hidrógeno con el CO₂ para formar metanol sintético, y
4. transformación del metanol sintético en e-fuel, con un proceso específico según se desee e-gasolina, e-diésel u otros combustibles.

Los carburantes sintéticos se consideran neutros en carbono debido a que el carbono del CO₂ producido en su combustión proviene enteramente del CO₂ capturado en la fabricación del e-fuel. Gracias al uso de esta alternativa, la totalidad del parque móvil actual mundial, predominantemente ICEV, podría pasar a ser neutra en carbono sin necesidad de ninguna renovación de flota.

A fecha de 2022, la producción de e-fuels a gran escala aún es imposible debido al escaso desarrollo de esta tecnología por su reciente descubrimiento. La eficiencia energética en su fabricación es muy reducida, lo que conlleva que sus costes de obtención sean superiores a los de los combustibles fósiles.

El proyecto “Haru Oni”, llevado a cabo en Chile en colaboración entre Siemens Energy (Alemania), Porsche (Alemania), ENAP (Chile) y Enel (Italia), creará la primera planta de producción de e-fuels del planeta. Tiene como objetivo producir 130.000 litros de e-gasolina en 2022, 55 millones en 2024 y más de 550 millones en 2026 a partir del autoconsumo de aerogeneradores [38]. En comparación, en 2019 se quemaron 1.530 millones de litros de gasolina en todo el mundo [39].

El análisis del potencial desarrollo y uso de los combustibles sintéticos queda fuera del alcance del presente trabajo debido a la incipiente fase de desarrollo que aún presentan. Futuros trabajos podrían ampliar el modelo CEVESA en esta línea.

1.2.2. CEVESA

CEVESA es un modelo de operación y expansión de las plantas de producción del sistema eléctrico ibérico con detalle horario compartido entre el IIT y el INESC TEC. Es un



modelo multianual y multizonal, debido a que representa endógenamente España y Portugal como dos nodos conectados por las interconexiones entre estos dos países.

En su versión simplificada, el despacho eléctrico se optimiza por medio de una minimización cuadrática de los costes del sistema desde un punto de vista holístico, sin considerar oligopolios o preferencias políticas o sociales, modelando la generación de los diferentes tipos de unidades de producción (térmica, solar, eólica, hidráulica, nuclear) horariamente a lo largo del horizonte temporal marcado, cada año representado por una semana sintética creada a partir de las series históricas anuales mediante el algoritmo genético descrito en [40]. Asimismo, se tienen en cuenta las inversiones en capacidad de generación por las empresas en forma de Generación Centralizada y por particulares en Generación Distribuida, y se consideran restricciones de capacidad, reserva secundaria, arranques, paradas y rampas de las unidades de producción.

En relación con la temática de este trabajo, CEVESA cuenta además con un módulo que modela la relación entre el sector eléctrico y el transporte. Dicho módulo ha sido progresivamente evolucionado en [41], [42] y [43] y solo contempla las tecnologías ICEV y BEV.

En [41] se lleva a cabo un análisis de cómo pueden afectar diferentes estrategias de recarga de BEV a la producción hidráulica, a los valles de demanda y a los precios de la electricidad, entre otros. [41] señala que la recarga no planificada de BEV puede aumentar las diferencias entre los picos y los valles de demanda, lo que provocaría unos mayores requerimientos de rampas de generación y de picos de demanda, encareciendo el sistema. También, destaca que una alta penetración de BEV podría llegar a reducir la necesidad de inversión en turbinación y bombeo, en el caso en que las baterías de los BEV pudiesen ser usadas de manera óptima para contribuir, durante el tiempo de conexión a la red, como una tecnología de almacenamiento con las restricciones impuestas por los requisitos de movilidad (tecnología *Vehicle to Grid*, V2G). En este artículo se considera que:

1. la inversión en renovables como la eólica o la cogeneración es un parámetro exógeno,
2. el estudio de la generación hidráulica es semanal,
3. no hay restricciones de red, y
4. la gestión de BEV es centralizada.



[42] desarrolla un análisis coste-beneficio desde tres puntos de vista: social, de los agentes de mercado (como agregadores de carga) y de los usuarios de los BEV. Se mejora el modelo de [41] con nuevas funcionalidades como, por ejemplo, el despacho horario de las unidades de generación hidro-térmicas y la inclusión de un modelo de perfiles de patrones de uso de los vehículos para estimar los tiempos de conexión potenciales de los BEV. Además, se añade un módulo externo para el análisis coste-beneficio de los BEV que incluye los costes de infraestructura necesarios para la expansión del BEV, y otras externalidades, como la independencia energética, o el impacto del CO₂ de los ICEV en el cambio climático o de sus emisiones contaminantes en la salud. Algunas de las hipótesis de este trabajo son:

1. el gobierno afronta el coste de externalidades como la emisión de partículas o la contaminación acústica,
2. los agentes de mercado asumen la instalación y gestión de las infraestructuras de recarga, buscando mediante contadores un consumo programado, y
3. el usuario afronta los costes de compra, operación y mantenimiento del BEV.

La principal conclusión de [42], similar a la de [41], es que no se recomienda una estrategia de recarga de BEV no optimizada, ya que conllevaría a unos mayores costes de operación del sistema e, incluso, a un mayor número de horas de energía no suministrada. Se finaliza con una evaluación de la influencia de algunas variables, como los distintos tipos de puntos de recarga eléctrica o diferentes criterios de salud pública, sobre los costes de infraestructura o de externalidades. Este estudio sugiere que una adopción a gran escala de BEV no sería rentable económicamente para el gobierno español, debido, sobre todo, a la fuerte inversión en CAPEX necesaria. Por ello, sería indispensable la inversión privada para conseguir este objetivo.

La mejora que [43] realiza sobre [42] reside en la inclusión de las inversiones en ICEV y BEV, para que la evolución de la penetración del BEV se determine de forma endógena. Por medio de una optimización de costes de los sistemas de transporte y eléctrico, estudia la penetración del BEV y el desplazamiento de los ICEV por los BEV en España para el periodo 2017 – 2037. Mediante este estudio, se valora la influencia de la recarga de BEV en el mix de generación eléctrica. Una de las principales conclusiones es que una fuerte inversión en generación renovable anticipada permitiría una introducción más temprana del BEV, lo que supondría un ahorro económico y de emisiones contaminantes para el sistema. Además, [43] apunta al descenso de la acogida del ICEV por una doble razón: por un lado,

el descenso de los costes de los BEV y, por otro, el aumento de los costes medioambientales. Por último, señala que los objetivos de emisiones máximas en el transporte impuestos por la Unión Europea no estarían alineados con un escenario óptimo de minimización de costes globales.

Por otro lado, con respecto al modelado de la red de hidrógeno, CEVESA cuenta con un módulo que simula la operación del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno con detalle semanal, formulado en [44]. Este trabajo, publicado en 2021, considera los sistemas español y portugués como dos sistemas de hidrógeno completamente separados, cada uno con un almacenamiento y un electrolizador reversible único. Este último es encargado de suplir toda la demanda, la cual es un parámetro exógeno semanal que no contempla la sobredemanda que puede provocar el progreso futuro de las ventas de FCEV en la Península Ibérica.

En [44] se permite el suministro de hidrógeno al electrolizador para que este actúe como una unidad de generación eléctrica y provea electricidad de vuelta a la red en momentos puntuales en los que el precio sea muy alto. Este hecho, sin embargo, no sucede en las simulaciones creadas en [44] debido a las ineficiencias del proceso. Los electrolizadores únicamente producen hidrógeno utilizando el exceso de energía y los ciclos combinados para cubrir la demanda y para almacenarlo si la capacidad instalada lo permite. El trabajo concluye mencionado que la capacidad de almacenamiento otorga flexibilidad y estabilidad al sistema general, y recomienda el almacenamiento por hidrógeno licuado frente al hidrógeno comprimido.

1.2.3. Otros modelos

Existen otros artículos técnicos previos que ya han analizado la expansión de los FCEV desde un punto de vista holístico de minimización de costes, en relación con los ICEV y los BEV. Por ejemplo, [45] realiza un análisis coste-beneficio de FCEV en comparación con ICEV para el mercado alemán en el periodo 2015 – 2050. Simula los resultados bajo diferentes escenarios de desarrollo tecnológico y de costes, y, además, tiene en cuenta la emisión de gases contaminantes en la generación de hidrógeno. La conclusión principal de [45] es que, para un coste de emisiones de 50 – 60 €/tCO₂, en 2050 los FCEV serían una alternativa tanto social como económicamente beneficiosa. Por último, propone una serie de soluciones para acortar la brecha entre dicho coste y el de 2015, que era próximo a 30 €/tCO₂.



En [46] se lleva a cabo un análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) en el que se evalúa el coste total de propiedad (TCO) de FCEV, BEV, ICEV, vehículos híbridos (HEV) y vehículos de gas natural comprimido (GNC) en Europa. Estos resultados se comparan para dos escenarios: uno en 2017 y otro en 2040. Además, realiza un análisis de sensibilidad Monte Carlo para determinar qué parámetros son los que tienen mayor influencia en los TCO. El artículo propone que, si la huella de carbono de la generación eléctrica es igual o inferior a la de una central actual de ciclo combinado, la sustitución de ICEV por BEV tendría sentido desde un punto de vista medioambiental y, para la mayoría casos, económico. Señala que los BEV con baterías más pequeñas y mayor autonomía serían los óptimos económica y medioambientalmente. No obstante, [46] sugiere que los HEV y los vehículos de GNC serían las mejores opciones para los usuarios que requieran vehículos con mayor autonomía. Por último, el artículo menciona que el desarrollo de los FCEV o BEV de gran autonomía está muy ligado al desarrollo tecnológico que sendas infraestructuras puedan presentar en el futuro: cuanto más se descarbonice su generación de energía aguas arriba, más rentables serán estos vehículos.

[47] analiza el cambio durante el periodo 2010 – 2050 del TCO de ICEV, HEV, BEV, FCEV y vehículos de gas en Reino Unido. Para ello, sigue un LCA en el que se tiene en cuenta el coste del desarrollo de las infraestructuras energéticas y eléctricas necesarias. Utiliza restricciones de crecimiento para cada tecnología de movilidad para, así, evitar crecimientos repentinos de alguna de ellas correspondientes a situaciones poco realistas. El artículo sugiere que, para que los FCEV tengan una penetración óptima en 2050, deberían comenzar a introducirse en el mercado en 2015. [47] señala que los costes de los diferentes tipos de impulsión deberían converger cerca de 2025 si alrededor de 2020 se inicia la fabricación a gran escala. Sin embargo, declara que a partir de ese momento la incertidumbre acerca del comportamiento del mercado o los avances de I+D provocaría que sea difícil prever cuál será la penetración de cada tecnología.

El estudio que guarda mayor similitud con el presente trabajo es [48]. En él, se calcula la evolución de las diferentes tecnologías de impulsión en el parque de vehículos de Europa, con especial énfasis en los FCEV, para el periodo 2020 – 2050. Se aplica un *soft-linking* de dos modelos diferentes: [49] y [50]. Por un lado, [49] simula la evolución del sector energético europeo, su mix de generación y sus precios. Por otro lado, [50] es un modelo de comportamiento de todos los agentes implicados en el mercado de turismos (autoridades,

infraestructura, fabricantes de vehículos y usuarios) que basa su funcionamiento en la interacción entre estos elementos.

El resultado principal de [48] viene reflejado en la Figura 5, en la que se refleja la estimación de que la expansión de FCEV que se prevé en dicho trabajo, se produce a partir de 2030.

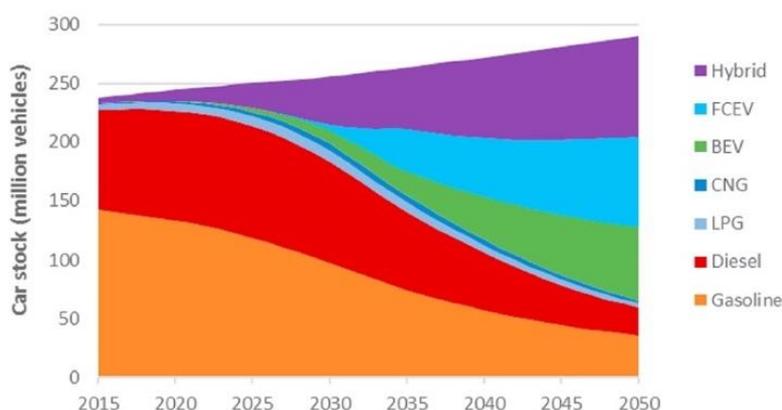


Figura 5. Penetración de turismos según tecnología en Europa para el periodo 2015 – 2050 [48].

Según [48], durante el periodo previo a la expansión del FCEV es más conveniente generar el hidrógeno a partir del reformado de gas combinado con el almacenamiento de CO₂, es decir, de forma gris. Después, cuando el CAPEX de las hidrogeneras y los FCEV hayan disminuido, se debería utilizar la electrólisis como principal tecnología de producción.

En [48] se valora, también, la importancia de varios tipos de políticas que impulsan el crecimiento de FCEV, como son los incentivos de compra, de combustible, de I+D y de construcción de infraestructura. Para el periodo 2020 – 2024, propone que la política más efectiva sería el impulso del I+D. En contraposición, para 2024 – 2034, los incentivos de compra, de combustible y de construcción de infraestructuras serían más recomendables. Siguiendo esta estrategia, se conseguiría en 2050 que los FCEV representaran el 26% del parque móvil europeo, mientras que, en un escenario sin estas políticas, la penetración de FCEV quedaría reducida al 16%.

Existen cuatro diferencias principales entre [48] y el presente trabajo. Primero, utiliza un modelo de comportamiento de mercado no lineal basado en System Dynamics que simula aspectos sociales y psicológicos de los compradores mediante bucles de causalidad. Por otro lado, no se simulan todas las horas de una semana sintética característica de cada año y país, sino se utilizan 24 horas representativas de cada año y país para el sector eléctrico y 12 para

el resto de sectores. Además, [48] considera más tecnologías de propulsión, añadiendo a las analizadas en este trabajo los vehículos híbridos combustión-eléctricos y los vehículos de gas (discriminando entre los que utilizan gas licuado de petróleo y gas natural comprimido), y diferenciando los ICEV diésel de los gasolina. Por último, no diferencia los distintos tipos de uso de los vehículos en flotas.

1.3. Justificación del trabajo

Este trabajo busca proyectar el despliegue de los BEV y de los FCEV en la Península Ibérica con un horizonte multianual, valorando sus costes de inversión, operación, mantenimiento y emisiones, y la implicación de su expansión tanto en el sistema de generación eléctrica como en el de hidrógeno. El objetivo del trabajo no es obtener una predicción exacta, sino ser una base sobre la que obtener conclusiones concluyentes desde las que proponer soluciones al reto de la transición energética.

Otras publicaciones, como [47] y [48], ya han tratado de dar respuesta a esa pregunta para los casos de Reino Unido y Europa, respectivamente. Dado el fuerte desarrollo actual de este tipo de tecnologías de transporte, la antigüedad de [47] (publicada en 2014) y [48] (2019) y la potencia de CEVESA para modelar la expansión del sistema eléctrico ibérico, se considera adecuado llevar a cabo realizar un estudio actualizado similar al de [47] y [48] aplicado al MIBEL ampliando el modelo CEVESA para potenciar su capacidad de simulación del sistema de transporte y acercándolo al objetivo de crear un modelo de simulación del sistema energético peninsular.

Para ello, este trabajo se han desarrollado dos módulos para CEVESA. Uno de ellos, basado en [44], simula la red de generación, almacenamiento y recarga de hidrógeno. El otro modela el funcionamiento y la recarga de los FCEV. Ambos módulos se integran dentro de CEVESA conjuntamente con el módulo de expansión del ICEV y BEV actualizando algunos datos de entrada utilizados en [41], [42] y [43].

En la Tabla 1 se recogen los puntos diferenciales de la literatura descrita en la sección 1.2 y del presente trabajo, marcando los avances que este trabajo supone. Se ha organizado la información según la naturaleza de las variables: endógenas al modelo, exógenas al modelo o no empleadas por el modelo. Además, se ha añadido un comentario sobre el objetivo de cada uno de los estudios y sus limitaciones con respecto al presente trabajo.



*Modelo de expansión de los sectores eléctrico y transporte:
Análisis del rol del vehículo de hidrógeno en la transición energética de Iberia*

Ref.	Inversión en transporte				Uso de flotas	Precios de electricidad	Cálculo de emisiones	Objetivo	Limitaciones
	ICEV	BEV	FCEV	Otros					
Este TFM	Endógena	Endógena	Endógena	No	Exógeno	Endógeno	Endógeno	Cálculo de la penetración de los ICEV, BEV y FCEV apoyado en CEVESA (2022-2045).	· No considera patrones sociales.
[41]	No	Exógena	No	No	Exógeno	Endógeno	No	Minimización de costes en el sistema eléctrico con <i>unit commitment</i> .	· Inversiones exógenas en eólica y cogeneración. · Hidráulica operada semanalmente.
[42]	No	Exógena	No	No	Exógeno	Endógeno	No	Minimización de costes en el sistema eléctrico con <i>unit commitment</i> y análisis coste-beneficio.	· Costes de la red de distribución no considerados. · Penetración de ICEV, BEV y FCEV no evaluada. · Sinergias entre BEV y generación eléctrica no evaluadas. · Simplificación de la red eléctrica.
[43]	Endógena	Endógena	No	No	Exógeno	Endógeno	Endógeno	Cálculo de la penetración de los ICEV y BEV apoyado en CEVESA (2017-2037).	· No considera patrones sociales. · Red de generación de H ₂ no evaluada.
[45]	Exógena	No	Exógena	No	No	Endógena	Endógena	Análisis coste-beneficio del FCEV en comparación con el ICEV (2015-2050).	· El crecimiento exógeno de ICEV y FCEV. · Incentivos a favor del FCEV no evaluados. · Penetración de BEV no evaluada. · Sin relación con el sistema eléctrico.
[46]	No	No	No	No	No	Exógena	Endógeno	Comparación de LCA y TCO de ICEV, PHEV, BEV, FCEV en 2017 y en 2040.	· Mercado energético exógeno. · No considera patrones sociales. · Penetración de ICEV, BEV y FCEV no evaluada. · Sinergias entre BEV y generación eléctrica no evaluadas. · Simplificación de la red eléctrica.
[47]	Endógena	Endógena	Endógena	Endógena	No	Endógena	Endógena	Cálculo de la variación de TCO y LCA del transporte teniendo en cuenta la evolución de las infraestructuras energéticas (2010-2050).	· Sin perfiles de uso de vehículos. · Año representado por 6 imágenes de mixes energéticos. · No considera patrones sociales. · Sinergias entre BEV y generación eléctrica no evaluadas. · Simplificación de la red eléctrica.
[48]	Endógena	Endógena	Endógena	Endógena	No	Endógena	Endógena	Simulación de la penetración en el mercado de las diferentes tecnologías de propulsión, bajo un modelo que evalúa el comportamiento del mercado y otro que modela la evolución del sector energético (2020-2050).	· Sin perfiles de uso de vehículos. · Año representado por 12 imágenes de mixes energéticos (24 para el sector eléctrico). · Red de recarga eléctrica no evaluada. · Simplificación de la red eléctrica.

Tabla 1. Clasificación del estado del arte.



2. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

En este apartado, primero, se define el trabajo y sus objetivos. Después, se muestra la metodología seguida para alcanzar dichos objetivos y los recursos económicos y tecnológicos que se calcula que son necesarios para conseguirlo. Por último, se fija cómo se encuadra el trabajo dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

2.1. Definición del trabajo

Este trabajo utiliza y amplía el modelo CEVESA para analizar la expansión combinada de la movilidad eléctrica y de hidrógeno, junto con el mix de generación de electricidad. El proyecto se basa en los resultados previos de [41], [42], [43] y [44], e incluye el modelado de los FCEV y de su mercado energético para la determinación de las cuotas de los diferentes tipos de vehículos, aspecto que no estaba cubierto en dichos estudios.

Se ha calculado de forma endógena el perfil óptimo de penetración de los diferentes tipos de vehículos (ICEV, BEV y FCEV) a lo largo del horizonte 2022 – 2045, considerando una serie de variables relativas a su crecimiento (económicas, técnicas y sociales) e integrando el modelo de expansión combinada resultante del trabajo descrito en [43].

Para lograr este objetivo, se propone una minimización de los costes del transporte (teniendo en los costes de infraestructura, de carburante, y CAPEX, OPEX y mantenimiento del vehículo, entre otros). Se considera un horizonte multianual, donde cada año se modela mediante una semana sintética representativa (ver [40]) para utilizar el modelado realizado en [43] sobre las rampas de generación y los costes de arranque y parada del sistema eléctrico. Así, se ha valorado el impacto de la recarga del BEV y de la generación de hidrógeno en la red eléctrica.

El sector del hidrógeno conserva mayor similitud con el de los carburantes convencionales, ya que el hidrógeno puede ser almacenado previamente al uso y los FCEV se recargan únicamente cuando el usuario lo decide, es decir, no se enchufan a la red cuando no se usan, como los BEV. Por ello, no es posible aplicar el modelo de recarga de BEV a los FCEV. Se ha creado un modelo horario que simule este comportamiento por flotas para

explotar de un modo realista el almacenamiento de hidrógeno y, así, determinar de manera óptima las horas de producción con base al coste de generación de la electricidad y la capacidad de generación y almacenamiento de hidrógeno instalada.

Por último, se ha tenido en cuenta la normativa y los objetivos de sostenibilidad medioambiental de la Unión Europea [14] en forma de restricciones para el problema de optimización. De este modo, se puede evaluar el coste gubernamental que tienen estos objetivos y su alineación con la realidad técnica y social. Además, se han valorado las sinergias entre BEV y FCEV para alcanzar dichas metas según el tipo de uso que tengan los vehículos.

2.2. Objetivos

Este proyecto cuenta con tres objetivos esenciales:

- Analizar la evolución combinada de BEV, de FCEV y de la capacidad de generación eléctrica, considerando los costes de infraestructuras y restricciones medioambientales, además de los datos que ya considera CEVESA.
- Analizar la penetración de ICEV, BEV y FCEV en el mercado ibérico de turismos, junto con la expansión de la capacidad de generación eléctrica, con un horizonte multianual bajo los criterios descritos en la sección anterior diseñando un conjunto de escenarios representativos, y concluir a partir de los resultados obtenidos.
- Comprobar la alineación de los objetivos medioambientales de la Unión Europea [14] con la realidad socioeconómica y tecnológica de España y Portugal.

2.3. Metodología

La elaboración del trabajo se ha dividido en nueve fases diferenciadas, cuyo cronograma queda recogido en la Tabla 2.



Fase	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.
Definición y concreción de los objetivos											
Familiarización con el modelo CEVESA											
Modelado del sistema de generación de hidrógeno											
Modelado del sistema de recarga de hidrógeno											
Determinación de una estrategia de resolución e integración en el modelo CEVESA											
Validación del modelo conjunto											
Diseño de escenarios y evaluación de los casos de estudio											
Redacción de la memoria											
Revisión bibliográfica											

Tabla 2. Cronograma del proyecto.

La primera fase, realizada entre los meses de octubre y noviembre de 2021, corresponde a la definición y concreción de los objetivos del presente trabajo fin de máster. Durante esta fase, se delimitaron los límites del proyecto.

En paralelo, se llevó a cabo una revisión del estado del arte de la problemática, en la que se evaluaron los avances y las deficiencias de otros estudios para poder posicionar este trabajo correctamente. Una vez llevado a cabo este posicionamiento, comenzó a redactar el apartado 1. No obstante, el proceso de revisión bibliográfica perdurará durante todo el estudio.

Después de la redacción del primer apartado, se procedió a la fase de familiarización con las herramientas de modelado y resolución (GAMS – CPLEX) y con el modelo CEVESA. En el momento en el que se poseyó suficiente conocimiento, se comenzó a modelar, primero, el sistema de generación y, después, el sistema de recarga de hidrógeno.

La integración con CEVESA se tuvo en cuenta durante la creación de estos modelos, integración que se hizo efectiva cuando estos se terminaron. Después, se pasó a la fase de validación del modelo conjunto, que se comparó con los resultados de los artículos encontrados en la revisión del estado del arte.

Cuando el modelo se validó, se diseñaron y evaluaron escenarios sobre los que basar los resultados del trabajo. En esta fase se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con diferentes casuísticas.

Por último, se finalizó la redacción de la memoria y se elaboró la presentación de diapositivas. En particular, la redacción del documento escrito comenzó durante la finalización del proceso de validación debido a gran cantidad de tiempo que requiere.

2.4. Planificación y estimación económica

En esta sección, primero, se muestran los recursos empleados para la consecución del trabajo y, después, se valoran económicamente.

2.4.1. Recursos empleados

El modelo matemático de optimización sobre el que sienta las bases este proyecto se desarrolla en GAMS, utilizando una licencia de uso completa concedida por el IIT. Para facilitar el uso del modelo, los parámetros de entrada se introducen a través de un libro Excel, que se comunica con GAMS mediante una herramienta desarrollada en Visual Basic para Aplicaciones (VBA).

Durante la investigación, además, han sido usadas otras aplicaciones del paquete ofimático de Microsoft: Word para la redacción de la memoria, PowerPoint para la creación de la presentación de diapositivas, Teams para la comunicación con los directores del proyecto y OneDrive para el guardado en la nube de los documentos.

Por último, se utilizó el explorador de internet Google Chrome y licencias de uso de IEEE y Elsevier para la revisión de la literatura, y Zotero para gestionar las referencias bibliográficas.

A lo largo de todo el proceso se usó un ordenador Apple MacBook Pro de 13' (finales del 2016), que se calcula que tiene una vida útil de 8 años, con las siguientes características:

- **Procesador:** Intel Core i7 a 2,4 GHz (2 núcleos).
- **Memoria RAM:** 16 GB.



Debido a que el complemento de Excel utilizado para la comunicación con GAMS solo funciona en el sistema operativo Windows, se ha utilizado una VPN mediante Microsoft Remote Desktop a un servidor del IIT, que se calcula que tiene una vida útil de 5 años, con las siguientes especificaciones:

- **Procesador:** Intel Xeon Silver 4116 a 2,10 GHz (2 procesadores de 8 núcleos cada uno).
- **Memoria RAM:** 128 GB.

Por último, han sido necesarias 500 horas por parte del estudiante y 50 horas por cada director para el desarrollo del proyecto.

2.4.2. Valoración económica

En la Tabla 3 se exponen los costes unitarios de los recursos empleados para la realización del trabajo.

Recurso	Coste [€]
Ordenador personal (Apple MacBook Pro 13', finales 2016)	2.100
Ordenador IIT	5.000
Licencia de Microsoft 365 E3	424,8
Licencia de IEEE	54
Licencia de Elsevier	340
Horas de trabajo del estudiante	15 [€/h]
Horas de trabajo de cada director	80 [€/(h·director)]

Tabla 3. Coste de los recursos económicos utilizados.

De tal modo, el coste total del proyecto es 21.581,3 €, tal y como se refleja a continuación.

$$2.100 \text{ €} \cdot \frac{1 \text{ año}}{8 \text{ años}} + 5.000 \text{ €} \cdot \frac{1 \text{ año}}{5 \text{ años}} + 424,8 \text{ €} + 54 \text{ €} + 340 \text{ €} + 500 \text{ h} \cdot 15 \text{ €/h} + 50 \text{ h} \cdot 80 \text{ €/h} \cdot \text{director} \cdot 3 \text{ directores} = 21.581,3 \text{ €} \quad (1)$$

2.5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El 25 de septiembre de 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) definió 17 objetivos globales en relación con la erradicación de la pobreza, la sostenibilidad medioambiental del planeta y el aseguramiento de la prosperidad [51]. Para estos objetivos, llamados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se marcó el horizonte de satisfacción en 2030.

Durante la elaboración de este trabajo se buscó que su publicación signifique un impulso a favor de la consecución de los ODS. A propósito, los ODS con los que este proyecto se encuentra alineado son:

- **Objetivo 3: Salud y Bienestar.** Gracias a la proliferación de los BEV y FCEV, se eliminará al completo la emisión local de gases contaminantes de los turismos y se reducirá en gran medida la contaminación acústica producida por ellos. De tal forma, las ciudades se convertirán en un lugar más saludable en el que vivir con un mayor grado de bienestar.
- **Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante.** La evolución hacia una producción más verde en los sistemas de generación de energía, tanto eléctrica como de hidrógeno, queda contemplada en este proyecto, y se potenciará bajo unos criterios de optimización económica y de emisiones. Así, en este trabajo, se propone una transformación sostenible económicamente hacia una generación de energía más limpia.
- **Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** El impulso en I+D y la creación de nuevas infraestructuras que posibiliten la introducción de tecnologías de transporte sostenibles es una de las bases de este proyecto. Mediante la inversión en innovación e infraestructuras, será posible la introducción del FCEV como vehículo alternativo menos contaminante, y, en este estudio, se busca optimizar esa inversión siguiendo un balance entre rapidez de penetración y economía.
- **Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables.** La planificación optimizada de la generación de energía busca eliminar cualquier tipo de ineficiencias en la producción para que el aprovechamiento de los recursos sea



máximo. Asimismo, el análisis filtrado por tipo de usuario que se lleva a cabo en este estudio conseguirá reducir más, si cabe, el consumo de energía global, debido a que hay tecnologías que son más frugales que otras según el uso del vehículo.

- **Objetivo 13: Acción por el Clima.** El principal motivo de la introducción de vehículos alternativos, como el BEV y el FCEV, es el frenado del cambio climático. En este proyecto se trata de reducir al máximo las emisiones, tanto local como globalmente, por medio de la introducción de los BEV y FCEV, y la planificación de la inversión en infraestructuras menos contaminantes de generación eléctrica y de hidrógeno.



Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el proyecto [51].

3. MODELADO

En este apartado se expone, en primer lugar, las hipótesis asumidas en su formulación y, después, la base de funcionamiento del modelo desarrollado. A continuación, se muestra la función objetivo a minimizar y las restricciones a las que se somete dicha optimización.

3.1. Hipótesis de modelado

La realidad física de los sistemas eléctrico, de hidrógeno y de transporte se ha simplificado linealizando sus ecuaciones con objeto de poder resolverlas en GAMS en un tiempo de ejecución asumible. Las hipótesis de simplificación se enumeran en los siguientes subapartados.

3.1.1. Hipótesis de modelado del sistema eléctrico

- El comportamiento de las redes de transporte y distribución no es objeto de modelado.
- Se considera un mercado de competencia perfecta, esto es, sin oligopolios. Por tanto, el precio de mercado de la electricidad coincide con el coste marginal del sistema. Este precio es una salida del modelo, calculada como variable dual de la ecuación de balance entre generación y demanda.
- No se realizan inversiones en generación.
- El límite de intercambios de electricidad entre España y Portugal se ha aumentado para tratar que no sature en ningún momento, para, así, reducir la dependencia de los resultados del modelo con los parámetros exógenos que proyectan el incremento de capacidad de generación eléctrica renovable en España y Portugal separadamente, ya que el análisis de su realismo queda fuera del alcance del presente trabajo.

3.1.2. Hipótesis de modelado del sistema de hidrógeno

- Se modela el sistema con una única planta electrolizadora y un único depósito de almacenamiento de hidrógeno.

- El electrolizador es reversible, pero no puede generar hidrógeno y electricidad en la misma hora.
- No se realizan inversiones en la generación, en el almacenamiento ni en la distribución.
- No se contabilizan los costes de operación de la distribución.

3.1.3. Hipótesis de modelado del sistema transporte

Además de las hipótesis descritas en [43], se han considerado las siguientes, que se refieren al vehículo de hidrógeno:

- Únicamente se consideran vehículos 100% FCEV.
- Todos los FCEV tienen el mismo precio, depósito y consumo de hidrógeno, sea cual sea la flota a la que pertenecen.
- La elección de un tipo de vehículo sobre otro solamente atiende a la de menor coste, no a preferencias o gustos de consumidor.
- La cantidad que se recarga de hidrógeno es un parámetro exógeno, y este repostaje se produce al inicio de la hora si es necesario.
- La inversión en nuevos vehículos se lleva a cabo al inicio del año.

3.2. Planteamiento y flujograma

La extensión propuesta de CEVESA se divide en dos partes diferenciadas, que modelan el sector del hidrógeno y del transporte de forma horaria.

Por un lado, en el sector del hidrógeno se abarca la producción de hidrógeno mediante electrolizadores, su almacenamiento, su demanda (tanto para el sector transporte como para otros usos) y la generación de electricidad a partir del hidrógeno almacenado por medio de la electrólisis inversa. En la Figura 7 se muestra el planteamiento de su modelado, basado en el desarrollado en [44].

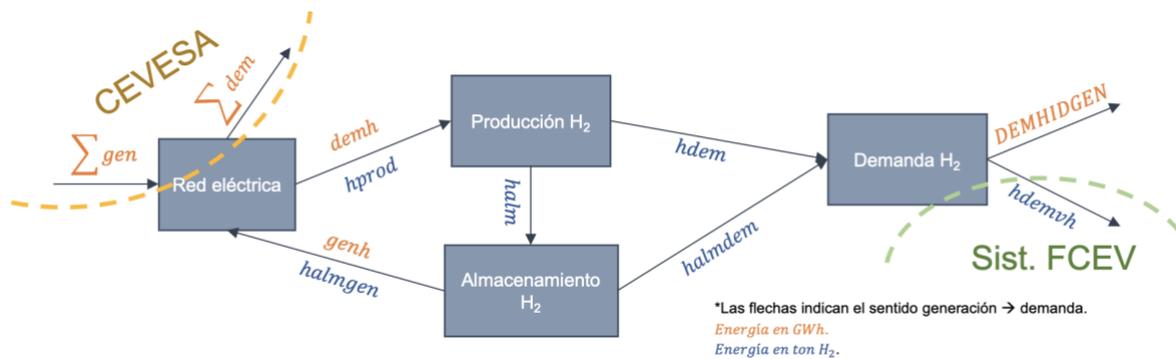


Figura 7. Esquema de los flujos de energía del sector de hidrógeno.

Las flechas de la Figura 7 indican en sentido de la energía desde la generación hasta la demanda, y el texto que se encuentra contiguo a ellas es el nombre de la variable endógena (si es en minúscula) o del parámetro exógeno (si es en mayúscula) que representa este flujo de energía. El color de los nombres representa las unidades utilizadas en dichos parámetros o variables: los naranjas están medidos en GWh y los azules en kg de hidrógeno. Las líneas discontinuas marcan los límites de módulo, señalándose con qué otros módulos está interconectado.

Cabe destacar que la producción de hidrógeno que se lleva a cabo en el electrolizador ($hprod$) es una carga para el sistema eléctrico ($demh$), debido a que es necesario el consumo de electricidad para dicha producción. En este proceso, se utiliza un rendimiento de la electrólisis directa ($H2_REND$). Asimismo, la generación de electricidad por electrólisis ($genh$) es una carga para el sistema del hidrógeno ($halmgen$), y se usa un rendimiento de la electrólisis inversa ($H2_RENDINV$).

En el almacenamiento también suceden pérdidas de energía, tanto a la entrada como a la salida de hidrógeno, cuantificadas en el parámetro $H2_RENDALM$. La variable $halm$ representa la parte del hidrógeno producido en el electrolizador que va hacia el almacenamiento, es decir, es el hidrógeno que verdaderamente se almacena sumado a las pérdidas de entrada. Por su parte, las variables $halmgen$ y $haldem$ simbolizan el hidrógeno que va desde el almacenamiento hacia el electrolizador y la demanda, respectivamente, es decir, el hidrógeno que sale del almacenamiento menos las pérdidas de salida.

La demanda de hidrógeno se divide en un parámetro exógeno ($DEM HIDGEN$) y una variable endógena ($hdemvh$). El primero hace referencia a la demanda horaria de hidrógeno industrial en la Península Ibérica, mientras que la segunda computa la demanda horaria de

hidrógeno de todas las flotas de FCEV de la península, por lo que se utiliza como nexo entre el sector hidrógeno y el sector transporte.

Por otro lado, el sector transporte se modela con 21 tipos de flotas para cada país, que pueden estar formadas enteramente por ICEV, BEV o FCEV, o de una mezcla entre ellos. En este trabajo, como aportación innovadora se ha modelado la parte correspondiente al FCEV del sector transporte, que se añade sobre los módulos de ICEV y BEV que fueron añadidos en [43]. La Figura 8 muestra que la variable $hdemvh$ es la suma de las demandas de hidrógeno propias de cada flota ($hdemvhflot_n$).

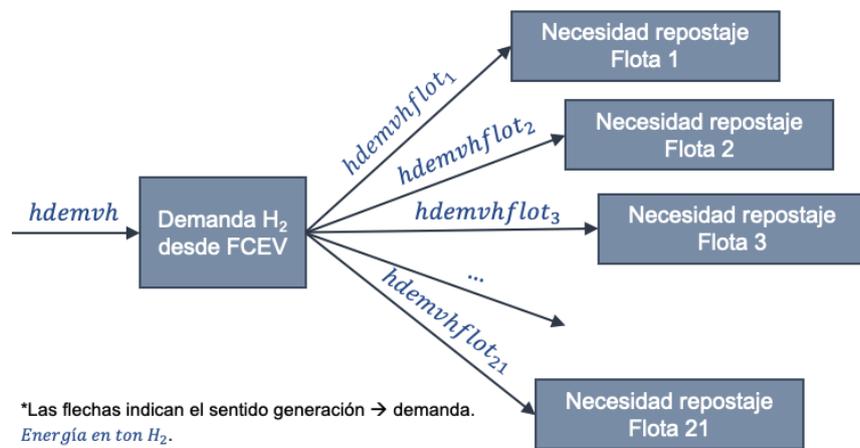


Figura 8. Esquema de los flujos de energía del sector transporte FCEV.

$hdemvhflot_n$ únicamente tiene un valor distinto de cero cuando la flota repostada. Por ello, es necesario crear un modelo que simule el comportamiento de las flotas de FCEV en función de su tipo de uso, simulando el nivel del depósito de los FCEV en cada hora, tal y como se muestra en la Figura 9.

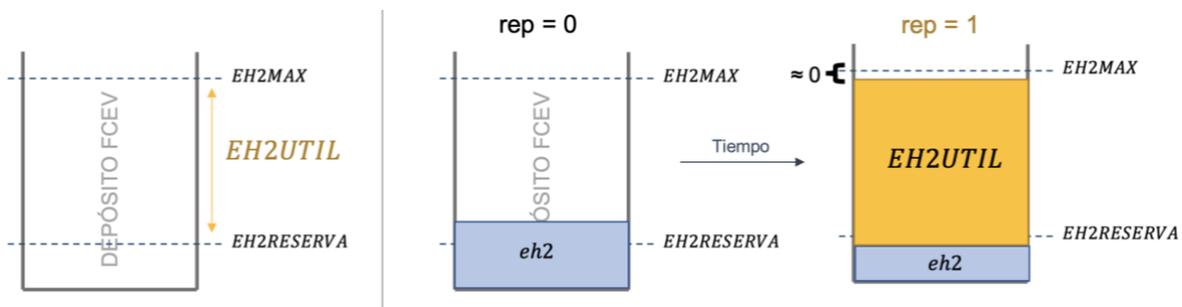


Figura 9. Modelado del nivel de depósito de los FCEV.

En la Figura 9 se representan tres depósitos de FCEV. El primero de ellos, a la izquierda, muestra que el parámetro $EH2UTIL$ es la cantidad de hidrógeno entre el nivel de llenado completo del depósito ($EH2MAX$) y el nivel de reserva ($EH2RESERVA$). $EH2UTIL$

es, además, el parámetro exógeno que marca la cantidad de hidrógeno que se reposta cuando es necesario.

El segundo y tercer depósito de la Figura 9 son dos imágenes del mismo depósito en horas diferentes. En el depósito del centro, el nivel del depósito de hidrógeno ($eh2$), representado por la caja azul, es suficiente como para no ser necesario el repostaje, ya que se encuentra por encima del nivel reserva. En el de la derecha, el nivel del depósito ya está por debajo del nivel reserva, por lo que en ese instante se reposta una cantidad igual a $EH2UTIL$, simbolizada con una caja amarilla. La variable binaria rep marca la necesidad o no de repostaje: si su valor es 1, el FCEV ha repostado en esa hora.

$eh2$ se reduce progresivamente en función del consumo de hidrógeno del FCEV y de los kilómetros recorridos en cada hora según su perfil de uso. Como la simulación no es continua, sino que tiene saltos horarios, puede ocurrir que en el momento que el modelo detecte que es necesario el repostaje, el nivel de hidrógeno ya sea inferior al nivel reserva. Es este el motivo por el que es necesario ese nivel de reserva en el modelo.

La cantidad que se reposta es un parámetro exógeno en lugar de una variable endógena para mantener la linealidad en el problema. Este hecho provoca que haya ocasiones en las que en el repostaje no se llene el depósito al máximo, no obstante, esta diferencia en ningún momento es significativa.

3.3. Nomenclatura

En esta sección se recoge la nomenclatura de los índices, variables exógenas (parámetros) y variables endógenas utilizadas. Los índices y las variables endógenas se simbolizan en minúscula, mientras que los parámetros, en mayúscula.

Índice	Significado
h	Hora.
a	Año.
f	Flota de vehículos (perfil de uso).
z	Zona (España o Portugal).
t	Tecnología de propulsión (ICEV, BEV o FCEV).
g	Planta de generación de electricidad

Tabla 4. Nomenclatura de los índices.

Parámetro	Significado
$CG_{a,g,z}^{VAR}$	Coste variable anual de las plantas de producción eléctrica [€/MW].
$CG_{a,g,z}^{ARR}$	Coste de arranque de las plantas de producción eléctrica [€].
$CG_{a,g,z}^{PAR}$	Coste de parada de las plantas de producción eléctrica [€].
$C_{a,z}^{EM}$	Coste de las emisiones de CO ₂ [€/ton CO ₂].

Tabla 5. Nomenclatura de los parámetros exógenos.

Parámetro	Significado
$C_{a,z}^{COMB}$	Coste del combustible [€/L].
$CV_{a,t}^{MANT}$	Coste anual de mantenimiento de los vehículos [€/miles de veh.].
$CV_{a,t}^{INV}$	Coste de inversión de los vehículos [€/miles de veh.].
$EMGAS_{f,z}$	Emisiones de CO ₂ por la combustión de los carburantes [ton CO ₂ /L].
$KM_{h,f,z,t}$	Distancia recorrida por vehículo y por hora [km].
$CH_{a,z}^{VAR}$	Coste variable de las plantas de producción de hidrógeno [€/MWh].
$CH_{a,g,z}^{ALM}$	Coste variable de las plantas almacenamiento de hidrógeno [€/MWh].
TD_a	Tasa de descuento anual [%].
$DEM H I D G E N_{h,a,z}$	Demanda de hidrógeno para usos no relacionados con la movilidad [GWh].
$H I D P O T I N S T_{a,z}$	Potencia instalada de los electrolizadores [GW].
$H I D P O T A L M_{a,z}$	Capacidad del almacenamiento de hidrógeno [ton H ₂].
$H 2_R E N D_{a,z}$	Eficiencia del electrolizador para convertir electricidad en hidrógeno [%].
$H 2_R E N D I N V_{a,z}$	Eficiencia del electrolizador para convertir hidrógeno en electricidad [%].
$H 2_R E N D A L M_{a,z}$	Eficiencia a la entrada o salida del electrolizador [%].
$F C O N V E H 2$	Factor de conversión de electricidad a hidrógeno [ton H ₂ /GWh].
$F C O N V H 2 E$	Factor de conversión de hidrógeno a electricidad [GWh/ton H ₂].
$E H 2 M A X_a$	Capacidad máxima del depósito de un FCEV [kg H ₂].
$E H 2 R E S E R V A_a$	Capacidad del nivel reserva del depósito de un FCEV [kg H ₂].
$E H 2 U T I L_a$	Capacidad entre la máxima y la reserva del depósito de un FCEV [kg H ₂].
$C M E D I O_a^{F C E V}$	Consumo medio de hidrógeno de un FCEV [kg H ₂ /km].
$C M E D I O_a^{I C E V}$	Consumo medio de combustible de un ICEV [L/km].
$T I N C_a$	Tasa estimada de incremento anual de vehículos [%].
$P I N I_{f,z,t}$	Número de vehículos inicial de cada flota y tecnología [miles de veh.].
$V U$	Vida útil del vehículo [años].
$E M G E I M A X_{a,z}$	Emisiones máximas permitidas de CO ₂ [ton CO ₂].

Tabla 6. Nomenclatura de los parámetros exógenos (cont.).

Parámetro aux.	Significado
M	Valor próximo a $+\infty$.
ε	Valor próximo a 0.

Tabla 7. Nomenclatura de los parámetros auxiliares.

Variable	Significado
$cse_{a,z}$	Coste anual asociado al sector eléctrico [€].
$cmantg_{a,g,z}$	Coste de mantenimiento anual de las plantas de producción eléctrica [€].
$cinvg_{a,g,z}$	Coste de inversión anual de las plantas de producción eléctrica [€].
$gen_{h,a,g,z}$	Potencia eléctrica generada [MW].
$emgen_{h,a,g,z}$	Emisiones de CO ₂ en la generación de electricidad [ton CO ₂].
$arr_{h,a,g,z}$	Decisión de arranque [binaria].
$par_{h,a,g,z}$	Decisión de parada [binaria].
$ersh_{a,z}$	Coste anual asociado al sector hidrógeno [€].
$ersh_{a,z}$	Coste anual asociado al sector transporte [€].
$pcoches_{a,f,z,t}$	Número de vehículos de cada flota y tecnología [miles de veh.].
$newcoches_{a,f,z,t}$	Número de vehículos nuevos de cada flota y tecnología [miles de veh.].
$demh_{h,a,z}$	Demanda de electricidad del electrolizador [GWh].
$genh_{h,a,z}$	Producción de electricidad del electrolizador [GWh].
$hprod_{h,a,z}$	Producción de hidrógeno en el electrolizador [ton H ₂].
$hdem_{h,a,z}$	Parte de la producción de hidrógeno que va a la demanda [ton H ₂].
$halm_{h,a,z}$	Parte de la producción de hidrógeno que va al almacenamiento [ton H ₂].
$halmdem_{h,a,z}$	Parte de la demanda de hidrógeno cubierta desde el almacenamiento [ton H ₂].
$halmgen_{h,a,z}$	Demanda de hidrógeno del electrolizador [ton H ₂].
$nivelalm_{h,a,z}$	Nivel actual de almacenamiento de hidrógeno [ton H ₂].
$hdemvh_{h,a,z}$	Demanda de hidrógeno de la totalidad de los FCEV [ton H ₂].
$hdemvhflot_{h,a,f,z}$	Demanda de hidrógeno de cada flota de FCEV [ton H ₂].
$eh2_{h,a,f,z}$	Nivel actual del depósito de un FCEV [kg H ₂].
$rep_{h,a,f,z}$	Necesidad de repostaje [binaria].
$i_{desigualdad}$	Función indicadora: si la desigualdad se cumple, toma valor 1; en caso contrario, 0.

Tabla 8. Nomenclatura de las variables endógenas.

3.4. Función objetivo

CEVESA busca optimizar de forma transversal el sistema eléctrico, de hidrógeno y de transporte mediante una minimización de la suma de sus costes. En este caso, a modo de simplificación, el modelo no simulará nuevas inversiones en generación eléctrica ni de hidrógeno. Por su parte, las inversiones en nuevos vehículos se llevarán a cabo sin tener en cuenta las preferencias de los consumidores, es decir, se compararán los vehículos que el algoritmo considere que son más baratos durante su ciclo de vida desde un punto de vista centralizado.

En los costes no están incluidos los impuestos que aplican sobre los bienes y servicios debido a que el análisis se concibe desde un punto de vista gubernamental, no privado, por tanto, se ha considerado que el valor de los impuestos recogidos será devuelto a la sociedad en forma de servicios de igual cuantía.

Debido a que el horizonte temporal de la simulación es multianual, es necesario imponer una tasa de descuento que simule la revalorización futura del dinero para poder analizar los costes correctamente y sumarlos interanualmente. La función objetivo a minimizar se muestra en (2), en la que se suman los costes del sistema eléctrico (cse) del de hidrógeno (csh) y del de transporte (cst) descontados a través de la tasa de descuento (TD).

$$\min \sum_{a,z} \left(\frac{1}{1 + TD_a} \right)^a \cdot (cse_{a,z} + csh_{a,z} + cst_{a,z}) \quad (2)$$

Los tres sistemas están interconectados por restricciones de ligadura, que fuerzan las consecuencias de una decisión tomada en un sistema sobre los demás. Algunas de estas restricciones son (13), (14) y (30).

3.4.1. Costes asociados al sector eléctrico

Los costes del sector eléctrico incluyen el coste variable por la generación ($CG^{VAR} \cdot gen$), de arranque ($CG^{ARR} \cdot arr$), de parada ($CG^{PAR} \cdot par$), de emisiones de CO₂ ($C^{EM} \cdot emgen$) y de mantenimiento de las plantas generadoras ($cmantg$), tal y como se muestra en (3).

$$cse_{a,z} = \sum_{h,g} (CG_{a,g,z}^{VAR} \cdot gen_{h,a,g,z} + CG_{a,g,z}^{ARR} \cdot arr_{h,a,g,z} + CG_{a,g,z}^{PAR} \cdot par_{h,a,g,z} + C_{a,z}^{EM} \cdot emgen_{h,a,g,z}) + \sum_g (cmantg_{a,g,z}) \quad (3)$$

Las restricciones relativas al sistema eléctrico se pueden encontrar en las ecuaciones de la (2) a la (12) de [41] y de la (9) a la (16) de [52].

3.4.2. Costes asociados al sector hidrógeno

Los costes del sector del hidrógeno corresponden, por un lado, a la operación del electrolizador para generar hidrógeno y para convertirlo en electricidad (CH^{VAR}) y, por otro lado, al nivel de utilización del almacenamiento (CH^{ALM}) [44]. En [44] también se incluyen los costes de inversión para el reescalado del electrolizador, no obstante, en este trabajo solamente se contemplan inversiones en el parque de vehículos.

$$csh_{a,z} = \sum_h (CH_{a,z}^{VAR} \cdot (demh_{h,a,z} + genh_{h,a,z}) + CH_{a,g,z}^{ALM} \cdot nivelalm_{h,a,z}) \quad (4)$$

Tal y como se verá en la sección 3.5.1, las restricciones de la (6) a la (13) modelan las relaciones lógicas de las variables que conforma el sistema de hidrógeno.

3.4.3. Costes asociados al sector transporte

Los costes del sector transporte se dividen en, primero, los costes relacionados con el gasto de energía necesario para su funcionamiento y las contaminantes que esta transformación emite, y, segundo, los costes relacionados con el mantenimiento del parque móvil y las inversiones en vehículos nuevos.

Para el funcionamiento de todas las tecnologías de impulsión es necesario un consumo de energía. En el caso de los BEV y FCEV, el coste de la energía utilizada y su consiguiente emisión de contaminantes queda internalizado en (3), en ($CG^{VAR} \cdot gen$) y ($C^{EM} \cdot emgen$), respectivamente. Por ello, no es necesario contabilizar esos costes dentro de (5). Estos vehículos, además, no contaminan localmente, por lo que no se debe agregar un coste extra de emisiones por su uso. En cambio, CEVESA no modela el sector del petróleo y los combustibles fósiles, por lo que sí que es preciso agregar ese coste de combustible (C^{COMB}) y emisiones (C^{EM}) para los ICEV en (5).

El coste de inversión en nuevos vehículos (CV^{INV}) y de mantenimiento (CV^{MANT}) sí aplica para todos los tipos de grupo motopropulsor, y dependen del año y de la tecnología de impulsión (véanse secciones 4.1.2 y 4.1.3, respectivamente).

$$cst_{a,z} = \sum_{h,f} (C_{a,z}^{COMB} + C_{a,z}^{EM} \cdot EMGAS_{f,z}) \cdot CMEDIO_a^{ICEV} \cdot KM_{h,f,z,ICEV'} \cdot pcoches_{a,f,z,ICEV'} + \sum_{f,t} (CV_{a,t}^{INV} \cdot pcoches_{a,f,z,t} + CV_{a,t}^{MANT} \cdot pcoches_{a,f,z,t}) \quad (5)$$

En la sección 3.5.2 se muestran las restricciones (14) a (27) que modelan el sistema de transporte FCEV. Las ecuaciones que simulan la operación del parque de ICEV y BEV se pueden consultar en [43]. Las restricciones (28) a (30) de la sección 3.5.3 ligan los modelados de las diferentes tecnologías de impulsión.

3.5. Restricciones

Las restricciones añadidas a CEVESA en [41], [42] y [43] se han complementado con las siguientes, divididas entre las referidas al sistema de hidrógeno y al sistema de transporte por el FCEV.

3.5.1. Restricciones relacionadas con el sistema de hidrógeno

En primer lugar, se ha limitado la generación de energía del electrolizador a su capacidad instalada ($HIDPOTINST$), tanto para la generación de hidrógeno ($demh$) como para la de electricidad ($genh$).

$$demh_{h,a,z} \leq HIDPOTINST_{a,z} \quad (6)$$

$$genh_{h,a,z} \leq HIDPOTINST_{a,z} \quad (7)$$

Además, se ha fijado el nivel de almacenamiento máximo de hidrógeno ($nivelalm$) a la capacidad instalada en la reserva ($HIDPOTALM$).

$$nivelalm_{h,a,z} \leq HIDPOTALM_{a,z} \quad (8)$$

La masa de hidrógeno producida en el electrolizador ($hprod$) está directamente relacionada con la energía eléctrica consumida por el electrolizador ($demh$), y es directamente proporcional a la eficiencia del electrolizador en el proceso directo ($H2_REND$).

$$demh_{h,a,z} = \frac{hprod_{h,a,z}}{FCONVEH2 \cdot H2_REND_{a,z}} \quad (9)$$

Del mismo modo, la energía eléctrica generada en el electrolizador ($genh$) está también directamente relacionada con la masa de hidrógeno que llega al electrolizador ($halmgen$), y es directamente proporcional a la eficiencia del electrolizador en el proceso inverso ($H2_RENDINV$).

$$genh_{h,a,z} = halmgen_{h,a,z} \cdot FCONVH2E \cdot H2_RENDINV_{a,z} \quad (10)$$

De la masa de hidrógeno que se produce en el electrolizador ($hprod$), una parte va directamente a la demanda ($hdem$), mientras que la otra se almacena en depósitos de reserva ($halm$).

$$hprod_{h,a,z} = hdem_{h,a,z} + halm_{h,a,z} \quad (11)$$

El funcionamiento del almacenamiento se rige por su nivel de hidrógeno ($nivelalm$). Este nivel es el de la hora anterior ($nivelalm_{h-1}$), más la cantidad de hidrógeno que llega al almacenamiento ($halm$), menos la que sale, ya sea hacia la demanda ($halmdem$) o hacia el electrolizador para producir electricidad ($halmgen$). Cabe destacar que, como hay pérdidas a la entrada y a la salida del depósito, $halm$, $halmdem$ y $halmgen$ no simbolizan la masa de hidrógeno que entra y sale del depósito, sino la masa que va hacia el almacenamiento y la aprovechable salida desde el almacenamiento.

$$nivelalm_{h,a,z} = nivelalm_{h-1,a,z} + halm_{h,a,z} \cdot H2_RENDALM_{a,z} - \frac{halmdem_{h,a,z}}{H2_RENDALM_{a,z}} - \frac{halmgen_{h,a,z}}{H2_RENDALM_{a,z}} \quad (12)$$

La demanda de hidrógeno ($hdemvh + DEMHIDGEN \cdot FCONVEH2$) es cubierta por la producción del electrolizador que no pasa por el almacenamiento ($hdem$) y la reserva en el almacenamiento ($halmdem$).

$$halmdem_{h,a,z} + hdem_{h,a,z} = hdemvh_{h,a,z} + DEMHIDGEN_{h,a,z} \cdot FCONVEH2 \quad (13)$$

3.5.2. Restricciones relacionadas con el sistema transporte FCEV

La demanda horaria de hidrógeno relativa al FCEV ($hdemvh$) es la suma de la demanda horaria de las 21 flotas de FCEV ($hdemvhflot$).

$$hdemvh_{h,a,z} = \sum_f hdemvhflot_{h,a,f,z} \quad (14)$$

La demanda de cada flota de FCEV ($hdemvhflot$) depende de si en esa hora se ha repostado o no (rep). Si no se reposta, la demanda de esa flota es nula. En cambio, si se reposta, la demanda de hidrógeno será igual al número de FCEV de esa flota ($pcoches$) multiplicado por el volumen repostado por cada vehículo ($EH2UTIL$). Por lo tanto, se tiene:

$$hdemvhflot_{h,a,f,z} = \begin{cases} 0, & \text{si } rep_{h,a,f,z} = 0 \\ pcoches_{a,f,z,'FCEV'} \cdot EH2UTIL_a, & \text{si } rep_{h,a,f,z} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

La ecuación (15) es una combinación de restricciones disyuntivas de carácter no lineal. Es necesario por tanto hacer una transformación mediante implicaciones, apoyándose en las Leyes de Morgan, para poder modelar de forma lineal el problema. Las ecuaciones (16) y (17) describen la primera restricción de la ecuación (15), mientras que las ecuaciones (18) y (19) modelan la segunda.

$$hdemvhflot_{h,a,f,z} \leq rep_{h,a,f,z} \cdot M \quad (16)$$

$$hdemvhflot_{h,a,f,z} \geq 0 \quad (17)$$

$$hdemvhflot_{h,a,f,z} - pcoches_{a,f,z,'FCEV'} \cdot EH2UTIL_a \leq (1 - rep_{h,a,f,z}) \cdot M \quad (18)$$

$$hdemvhflot_{h,a,f,z} - pcoches_{a,f,z,'FCEV'} \cdot EH2UTIL_a \geq (1 - rep_{h,a,f,z}) \cdot (-M) \quad (19)$$

Por otro lado, es necesario modelizar el nivel de hidrógeno ($eh2$) de un FCEV representativo de cada flota para conocer cuándo es necesario repostarlo. Si no se reposta, el nivel será el de la hora anterior ($eh2_{h-1}$), menos lo consumido durante esa hora. En cambio, si se reposta, a ese nivel es necesario sumarle la masa de hidrógeno repostada ($EH2UTIL$).

$$eh2_{h,a,f,z} = \begin{cases} eh2_{h-1,a,f,z} - CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z,'FCEV'}, & \text{si } rep_{h,a,f,z} = 0 \\ eh2_{h-1,a,f,z} + EH2UTIL_a - CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z,'FCEV'}, & \text{si } rep_{h,a,f,z} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

La ecuación (20) es, también, una combinación de restricciones disyuntivas que necesita convertirse en una serie de restricciones lineales. Utilizando el mismo procedimiento usado para la ecuación (15), se han obtenido las ecuaciones (21) y (22), que modelan la primera restricción de (20), y las ecuaciones (23) y (24), que describen la segunda.

$$eh2_{h,a,f,z} - eh2_{h-1,a,f,z} + CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z,'FCEV'} \leq rep_{h,a,f,z} \cdot M \quad (21)$$

$$eh2_{h,a,f,z} - eh2_{h-1,a,f,z} + CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z',FCEV'} \geq rep_{h,a,f,z} \cdot (-M) \quad (22)$$

$$eh2_{h,a,f,z} - eh2_{h-1,a,f,z} + EH2UTIL_a + CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z',FCEV'} \leq (1 - rep_{h,a,f,z}) \cdot M \quad (23)$$

$$eh2_{h,a,f,z} - eh2_{h-1,a,f,z} + EH2UTIL_a + CMEDIO_a^{FCEV} \cdot KM_{h,f,z',FCEV'} \geq (1 - rep_{h,a,f,z}) \cdot (-M) \quad (24)$$

La variable binaria rep se activa cuando el nivel de hidrógeno de la hora anterior del depósito ($eh2_{h-1}$) es igual o inferior al nivel reserva ($EH2RESERVA$), tal y como se ha explicado en la sección 3.2. Cuando el nivel del depósito se encuentra por encima de este umbral, el FCEV no repostará. Por tanto:

$$rep_{h,a,f,z} = \begin{cases} 0, & \text{si } eh2_{h-1,a,f,z} > EH2RESERVA_a \\ 1, & \text{si } eh2_{h-1,a,f,z} \leq EH2RESERVA_a \end{cases} \quad (25)$$

Al igual que las ecuaciones (15) y (20), la ecuación (25) es una combinación de restricciones disyuntivas. Por ello, del mismo modo que con (15) y (20), se han obtenido las ecuaciones (26), referida a la primera restricción de (25), y (27), referida a la segunda.

$$eh2_{h-1,a,f,z} - EH2RESERVA_a \leq (1 - rep_{h,a,f,z}) \cdot M \quad (26)$$

$$eh2_{h-1,a,f,z} - EH2RESERVA_a - \varepsilon \geq rep_{h,a,f,z} \cdot (-M) \quad (27)$$

3.5.3. Otras restricciones

En [43] se formularon las restricciones (28), (29) y (30), relativas al sistema de transporte, sobre las que se fundamenta el modelo propuesto. La primera de ellas controla el incremento en número de vehículos de la flota total actual ($pcoches$) a través de una tasa interanual ($TINC$).

$$\sum_t pcoches_{a,f,z,t} \geq (1 + TINC_a) \cdot \sum_t pcoches_{a-1,f,z,t} \quad (28)$$

La ecuación (29) categoriza los vehículos de la flota actual ($pcoches$) entre los nuevos ($newcoches$), los antiguos ($pcoches_{a-1}$) y los desguzados en cada año.

$$pcoches_{a,f,z,t} = pcoches_{a-1,f,z,t} + newcoches_{a,f,z,t} - i_{a \leq VU_{f,t}} \cdot \frac{PINI_{f,z,t}}{VU} \cdot pcoches_{a-1,f,z,t} - i_{a > VU} \cdot newcoches_{a-VU,f,z,t} \quad (29)$$

La ecuación (30) limita las emisiones máximas del sistema ($EMGEIMAX$) siguiendo los objetivos de descarbonización propuestos por la Comisión Europea [53].

$$\sum_{h,g} emgen_{h,a,g} + \sum_{h,t} pcoches_{a,f,z,ICEV'} \cdot CMEDIO_a^{ICEV} \cdot EMGAS_{f,z} \leq EMGEIMAX_{a,z} \quad (30)$$

4. DATOS DE ENTRADA

En el presente apartado se da valor a los nuevos parámetros exógenos introducidos en CEVESA. Primero, se muestran los relacionados con los costes y, después, los relacionados con los perfiles de uso de los vehículos. Por último, se describen los escenarios alternativos y se señala en qué datos se diferencian del escenario base.

4.1. Costes de los vehículos

Para obtener los datos futuros de costes de los BEV y FCEV se han utilizado los datos históricos sin IVA e iguales para España y Portugal.

4.1.1. Datos históricos

Se han contabilizado las ventas anuales de ICEV y BEV en España entre 2015 y 2021. El precio medio histórico de los BEV se ha obtenido discriminando las ventas anuales de BEV por modelo [20] y evaluando el precio medio (sin IVA) de dichos modelos en el momento de su venta [54, p. 77]. En el caso del ICEV, se han utilizado los valores medios de los vehículos vendidos en cada año, ofrecidos por la Agencia Tributaria [55].

	Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ICEV	Ventas en España [ud.]	1.030.619	1.167.947	1.272.899	1.362.387	1.301.986	967.326	898.872
	Precio medio [€ s/ IVA]	15.889	16.505	16.793	16.872	17.588	18.956	19.951
BEV	Ventas en España [ud.]	1.600	2.338	4.102	2.946	10.046	17.921	23.785
	Precio medio [€ s/ IVA]	24.094	26.226	32.692	31.858	35.485	32.700	34.903

Tabla 9. Datos históricos de ventas de ICEV y BEV en España [20], [54, p. 77], [55].

Con respecto los FCEV, en 2015 salió al mercado el primer modelo disponible para la venta al gran público, el Toyota Mirai (1ª gen.). Más tarde, en 2018, se puso a la venta el Hyundai NEXO. Por último, en 2021, el Toyota Mirai de 1ª generación fue reemplazado por su homónimo de 2ª generación.

En la Tabla 10 se muestran los datos oficiales de los vehículos mencionados en el momento que se pusieron en venta. Debido a que el Toyota Mirai (1ª gen.) se homologó en

Europa bajo el antiguo ciclo NEDC, se han tomado los datos de homologación estimados bajo el ciclo americano EPA, más similares a la homologación actual europea WLTP.

FCEV	Precio [€ sin IVA]	Consumo homologado [kg/100km]	Autonomía homologada [km]	Capacidad depósito [kg]	Periodo de comercialización
Toyota Mirai (1ª gen.)	66.000 ²	0,916 ³	502 ²	4,6	2015-2021
Hyundai NEXO	59.711	1,006	666	6,7	2018-Presente
Toyota Mirai (2ª gen.)	53.719	0,862	650	5,6	2021-Presente

Tabla 10. Datos técnicos de FCEV [56], [57], [58], [59].

Para los cálculos históricos de cada año, se ha tomado el dato medio entre los vehículos que estaban en comercialización en ese año, tal y como se muestra en la Tabla 11.

	Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
FCEV	Precio medio [€ s/ IVA]	66.000	66.000	66.000	62.856	62.856	62.856	56.715
	Consumo [kg/100km]	0,916	0,916	0,916	0,961	0,961	0,961	0,934
	Capacidad depósito [kg]	4,6	4,6	4,6	5,65	5,65	5,65	6,15

Tabla 11. Datos históricos técnicos de FCEV en España [56], [57], [58].

Para el periodo a partir de 2021, se han modelado curvas que estimen la evolución futura a partir de los datos históricos y de las previsiones de desarrollo de las tecnologías, tal y como se describen en las secciones 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4.

4.1.2. Coste de inversión

A partir de los datos históricos de precios de venta sin IVA (sección 4.1.1) se han modelado curvas que describan el precio sin IVA futuro de los vehículos según su tecnología de impulsión, mostradas en la Figura 10.

² En Alemania.

³ Estimación bajo el ciclo de homologación EPA.

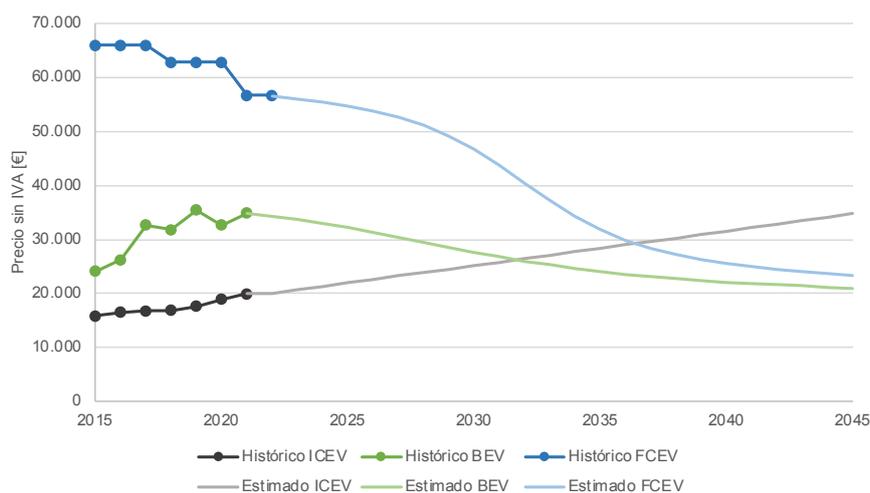


Figura 10. Evolución de precios de venta de los vehículos sin IVA [20], [54, p. 77], [55], [56], [57], [58].

El Consejo del Hidrógeno (Hydrogen Council) declaró en 2020 en [60] que “*el escalado de la producción de FCEV podría acarrear una reducción de sus costes de hasta un 70% frente a su precio en 2019*”. De tal forma, se ha estimado una evolución sigmoideal de su precio, alcanzando en 2045 una reducción del 63% de su coste, considerando que la producción de FCEV a partir de ese año seguirá en crecimiento, aunque ya que encontrará notablemente desarrollada. La pendiente es más pronunciada entre los años 2030 y 2035 debido a que ese periodo se produce el mayor desarrollo tecnológico de los FCEV [48].

Para estimar el precio futuro del ICEV se ha llevado a cabo una regresión lineal con sus precios históricos sin IVA del periodo 2015-2021. Se considera razonable que su precio vaya en aumento, ya que el progresivo endurecimiento de sus límites de emisiones [61] aumentará la dificultad técnica de sus motores, encareciendo sus precios. Además, también se estima que la hipótesis de que los FCEV no sean más baratos que los ICEV hasta 2037 es coherente, debido que el desarrollo actual de la tecnología FCEV está siendo más lento de lo esperado en 2015 [45].

Se ha establecido 2032 como punto de equilibrio entre el precio de los BEV e ICEV. Hay estudios declaran que esta igualdad de precios se dará antes (2027 [62]), sin embargo, es difícil de afirmar que este hecho suceda a tan corto plazo, ya que, al evaluar la progresión real histórica del precio del BEV e ICEV en España, se puede comprobar cómo el precio medio de los BEV sigue creciendo en 2021 más rápido que el precio medio del ICEV. En este trabajo se considera que el cambio de tendencia será más progresivo.

Además, se ha modelado la curva de BEV para que su precio de compra sea siempre inferior al de los FCEV, debido a la menor complejidad técnica de su sistema motopropulsor. El precio de las baterías es la variable con mayor incertidumbre y peso dentro del coste de adquisición de los BEV. La rareza de sus materiales puede provocar que, a medio plazo, este coste se incremente y el precio de los BEV sea superior. Por ello, se creará un escenario que modele esta situación.

4.1.3. Coste de mantenimiento

Se ha calculado un coste anual de mantenimiento de los FCEV a partir del coste de los BEV, 273,00 € por vehículo [43]. Se estima que, debido a la mayor complejidad del grupo motopropulsor, el coste de mantenimiento de los FCEV es un 12% superior al de los BEV [63], por tanto, el coste anual de mantenimiento de los FCEV se ha situado en 305,76 € por vehículo.

Coste anual de mantenimiento [€/vehículo]	
ICEV	572,40
BEV	273,00
FCEV	305,76

Tabla 12. Coste anual de mantenimiento de los vehículos [43], [63].

4.1.4. Coste de operación

El método de cálculo del coste de la energía utilizada para el movimiento de los ICEV y BEV se ha tomado directamente de [43]. El consumo de combustible (ICEV) o electricidad (BEV) y el precio del combustible son parámetros exógenos; en cambio, el precio de la electricidad es una variable endógena del modelo.

Como se ha mencionado en la sección 3.1.2, todo el hidrógeno necesario para cada país se produce en una planta electrolizadora a partir de electricidad. Entonces, el coste del hidrógeno está ligado al precio de la electricidad obtenido por el modelo, y es, por tanto, también endógeno.

La demanda de hidrógeno, como se ha comentado en la sección 3.2, depende de un parámetro exógeno (demanda horaria de hidrógeno industrial) y de una variable endógena (demanda por el uso de los FCEV, $hdemvh$). El valor de $hdemvh$ depende de dos factores,

los cuales son parámetros exógenos: el consumo de hidrógeno de los FCEV (sección 4.1.4.1) y la capacidad útil de su depósito (sección 4.1.4.2). Como comprobación de la fiabilidad del valor futuro seleccionado para estos parámetros, se ha calculado en la sección 4.1.4.3 la autonomía resultante al dividir estos parámetros y se ha valorado su potencial realismo.

4.1.4.1. Consumo de los FCEV

Se ha calculado para cada año del periodo 2015-2022 la media de los datos de consumo de los vehículos en venta y, a partir de esa evolución, se ha modelado una curva que describa el consumo futuro de los FCEV, mostrada en la Figura 11.

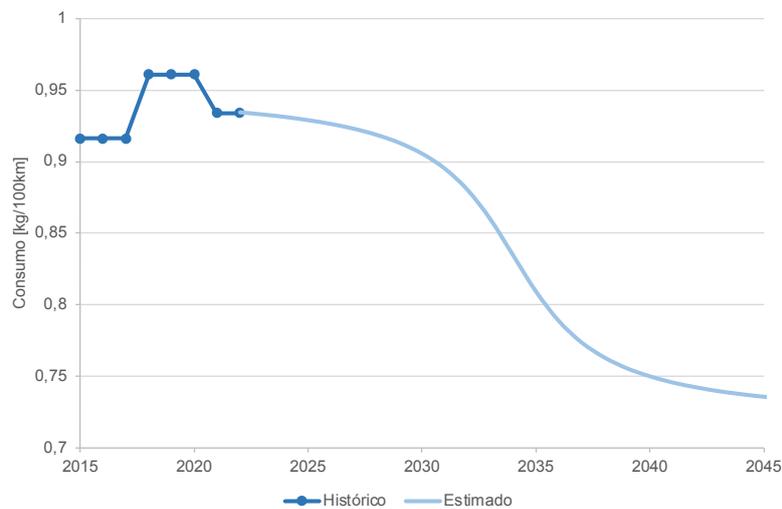


Figura 11. Evolución del consumo de los FCEV [56], [57], [58], [59].

Alrededor de 2035 se reduce el consumo medio más abruptamente, debido a que se ha considerado que en ese periodo se produce el mayor desarrollo tecnológico de los FCEV [48]. A partir de 2045, la curva se estabiliza en valores alrededor de 0,73 kg/100km, que se ha considerado como un valor razonable de consumo a largo plazo, conociendo el valor actual (0,93 kg/100km) y el potencial desarrollo que aún tiene esta tecnología.

4.1.4.2. Capacidad útil del depósito de los FCEV

Se ha establecido que la capacidad útil del depósito (cantidad de hidrógeno repostada) no es igual a la capacidad total del depósito (sección 3.2), debido a que los vehículos no se suelen repostar cuando su combustible se agota por completo, sino cuando se llega a un nivel establecido como “reserva”. Este nivel reserva es el necesario para recorrer 100 km, por tanto, es totalmente dependiente del consumo del FCEV (sección 4.1.4.1).

Para la capacidad máxima del depósito, al igual que para el consumo, se ha calculado para cada año del periodo 2015-2022 la media de los datos de capacidad máxima de depósito de los vehículos en venta y, a partir de esa evolución, se ha modelado una curva que describa la capacidad de depósito futura de los FCEV.

La Figura 12 muestra la evolución de las capacidades máxima y reserva de los FCEV.

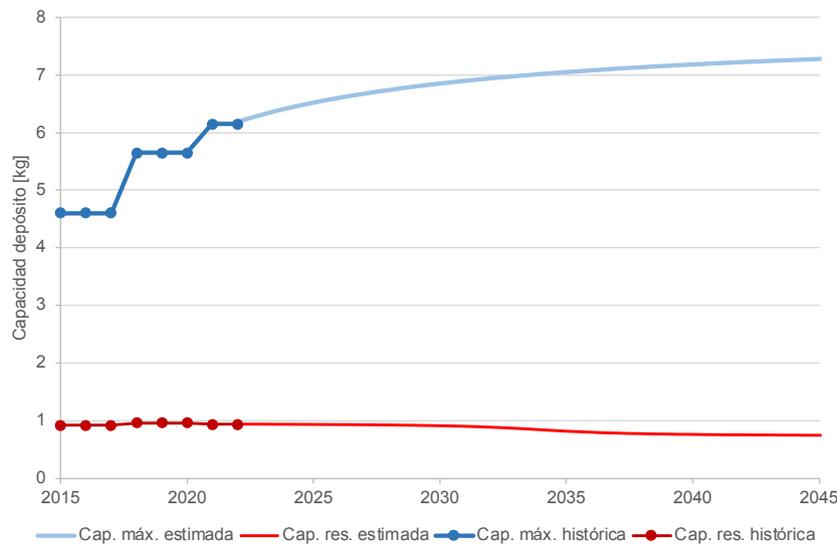


Figura 12. Evolución de la capacidad de depósito de los FCEV [56], [57], [58], [59].

La curva de capacidad máxima estimada es de tipo asintótico debido a que, por motivos de presión admisible de los depósitos y de límite de espacio en los vehículos, se ha considerado que la capacidad del depósito media del parque de vehículos nunca llegará a superar un valor determinado. Así pues, la asíntota se ha situado en 7,85 kg de capacidad máxima media del parque de FCEV.

Restando la capacidad máxima a la capacidad reserva, se obtiene la curva de capacidad útil del depósito, mostrada en la Figura 13.

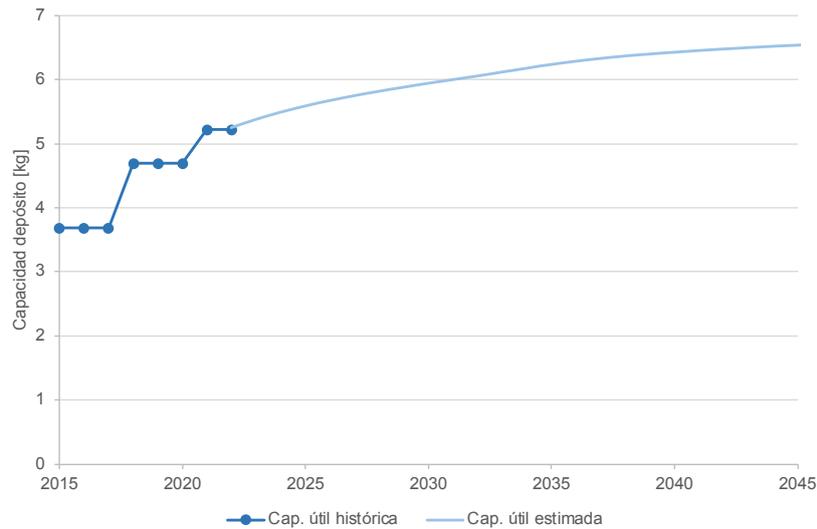


Figura 13. Evolución de la capacidad útil de depósito de los FCEV [56], [57], [58], [59].

4.1.4.3. Autonomía de los FCEV

Se ha calculado la evolución de la autonomía de los FCEV a partir del consumo y de la capacidad máxima del depósito, mediante la ecuación (31), para justificar la fiabilidad del valor seleccionado para el consumo de los FCEV y la capacidad máxima de su depósito.

$$Autonomía_a^{FCEV,est.} = \frac{EH2MAX^{est.}}{CMEDIO^{FCEV,est.}} \cdot 100 \text{ km} \quad (31)$$

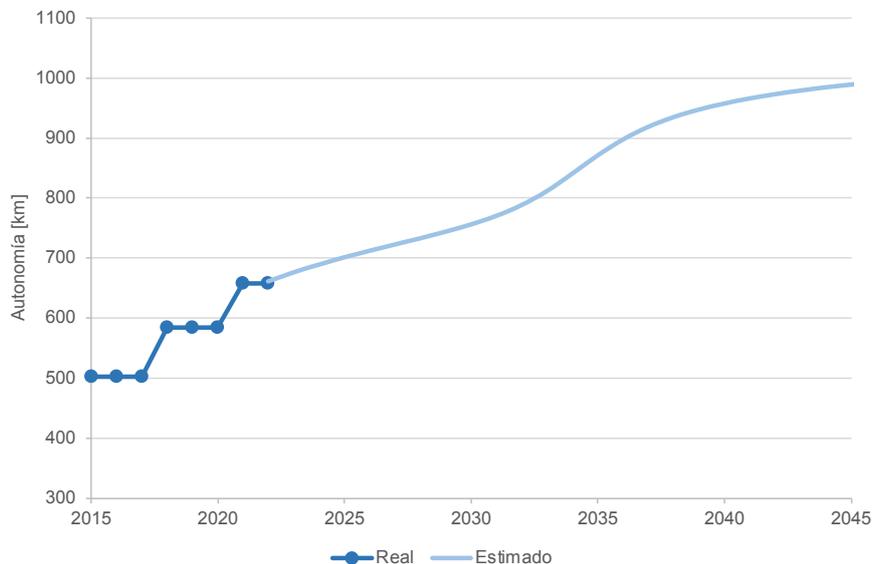


Figura 14. Evolución de la autonomía de los FCEV [56], [57], [58], [59].

En la Figura 14 puede observarse que se ha obtenido un valor de autonomía media del parque de FCEV de ~750 km en 2030 y ~1.000 km en 2045. En mayo de 2021, un Toyota

Mirai (2ª gen.) consiguió recorrer con solo un depósito 1.003 km [36]. Cabe destacar que esa cifra fue alcanzada mediante una conducción de tipo *hypermiling*⁴, no una conducción normal (la autonomía homologada WLTP de este modelo es de 650 km), y que los valores de la estimación se refieren a la autonomía media del parque de FCEV, no de la cifra máxima de autonomía lograda.

Este análisis de sensibilidad sugiere que la autonomía media estimada está en línea con el probable desarrollo de la tecnología. De esta forma, se validan de manera preliminar las estimaciones de consumo y nivel máximo de depósito.

4.2. Patrones de uso de los vehículos

El patrón de uso de los vehículos por flotas es igual para ICEV, BEV y FCEV, y sigue el diseño heurístico modelado en [42], diferenciando 21 flotas para distinguir diferentes perfiles de uso en función del tipo de día. Estos patrones de uso son iguales para los casos de España y Portugal.

Fleet	Mileage (km)	Driving hours								
		Working Days	Fridays	Saturdays	Sundays	Public Holidays	Christmas	Easter	July	August
TaxD50%	150	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	
TaxN50%	150	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59
TaxD15%	150	6:00-19:59	6:00-19:59				6:00-19:59	6:00-19:59	6:00-19:59	
TaxN15%	150	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59				00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59
TaxD35%	150	6:00-19:59	6:00-19:59				6:00-19:59	6:00-19:59		6:00-19:59
TaxN35%	150	00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59				00:00-5:59 + 20:00-23:59	00:00-5:59 + 20:00-23:59		00:00-5:59 + 20:00-23:59
T1.1	35	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	7:00-12:59	10:00-14:59	10:00-14:59	6:00-21:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59
T1.2	35/250	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	7:00-12:59	0:00-2:59	0:00-2:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59
T2	35	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	7:00-12:59	0:00-2:59	0:00-2:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59
T3	35	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 14:00-16:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59	7:00-9:59 + 18:00-20:59
T4	35	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 14:00-16:59	0:00-0:59 + 19:00-23:59	0:00-0:59 + 19:00-21:59	0:00-0:59 + 19:00-21:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	7:00-9:59 + 18:00-20:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59
T5	35	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 14:00-15:59	10:00-12:59 + 20:00-23:59	10:00-12:59 + 20:00-21:59	10:00-12:59 + 20:00-21:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59
T6	35	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 14:00-15:59	10:00-12:59 + 20:00-23:59	10:00-12:59 + 16:00-18:59	10:00-12:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59
T7	35/250	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	7:00-12:59	10:00-14:59	10:00-14:59	6:00-10:59 + 16:00-22:59	6:00-21:59 + 14:00-15:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59
T8	35	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 14:00-15:59	0:00-0:59 + 19:00-23:59	0:00-0:59 + 19:00-21:59	0:00-0:59 + 19:00-21:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-7:59 + 16:00-18:59	7:00-9:59 + 18:00-20:59	7:00-9:59 + 18:00-20:59
T9	35	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 14:00-16:59	10:00-12:59 + 20:00-23:59	10:00-12:59 + 16:00-18:59	10:00-12:59 + 16:00-18:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	6:00-9:59 + 17:00-20:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59	0:00-2:59 + 12:00-15:59
Auton1	150/200/250	8:00-19:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	8:00-19:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59	10:00-13:59 + 16:00-19:59
Auton2	150/200/250	8:00-19:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	8:00-19:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59	7:00-9:59 + 14:00-15:59
Auton3	150/200/250	8:00-19:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	8:00-19:59	7:00-9:59 + 18:00-20:59	6:00-21:59
Auton4	150/200/250	8:00-19:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	0:00-0:59 + 16:00-18:59	6:00-21:59	8:00-19:59	6:00-21:59	6:00-21:59
Otros	20	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59	0:00-5:59 + 12:00-16:59

Tabla 13. Utilización de las flotas de vehículos [42].

⁴ “Práctica de maximizar la economía de combustible de un vehículo de motor, especialmente a través de la técnica de conducción y el mantenimiento del vehículo” [37].

4.3. Evolución del parque de vehículos

La filosofía de modelado del parque total de vehículos de España y Portugal se ha tomado directamente de [43], donde a partir de una flota inicial de vehículos se proyecta un tamaño de flota futuro a través de una tasa de crecimiento exógena (ecuación **Error! Reference source not found.**). Los valores de flota inicial se ha cambiado con respecto a [43], sustituyéndolos por los valores actuales ofrecidos por ACEA [19]. Los datos se muestran en la Figura 15.

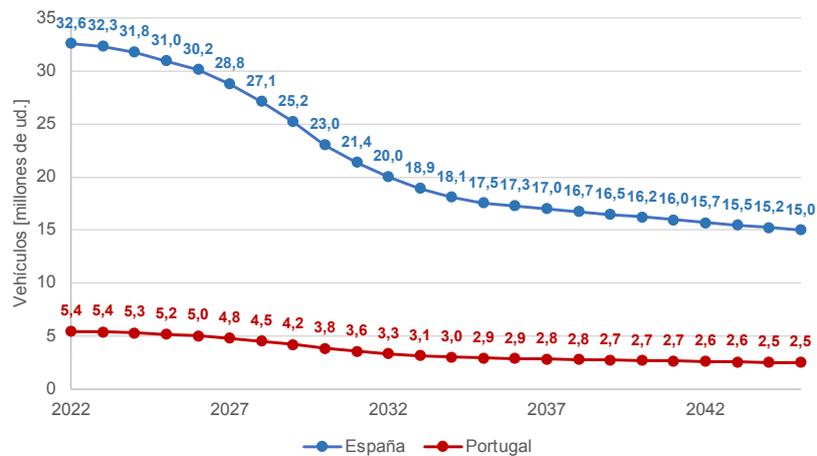


Figura 15. Previsión del parque total de vehículos [43], [19].

Dentro de la evolución del parque total se lleva a cabo un reemplazo de los vehículos obsoletos, es decir, de los que han superado su vida (ecuación **Error! Reference source not found.**). Esta vida es, en España, cada vez más larga [64], tal y como se muestra en la Figura 16. Por ello, siguiendo el criterio establecido en [43] y teniendo en cuenta que el fuerte desarrollo de las tecnologías cero emisiones supondrá que estos vehículos tengan durante esos años una obsolescencia más rápida que los ICEV, se ha modificado la vida media del parque de vehículos a 12 años.

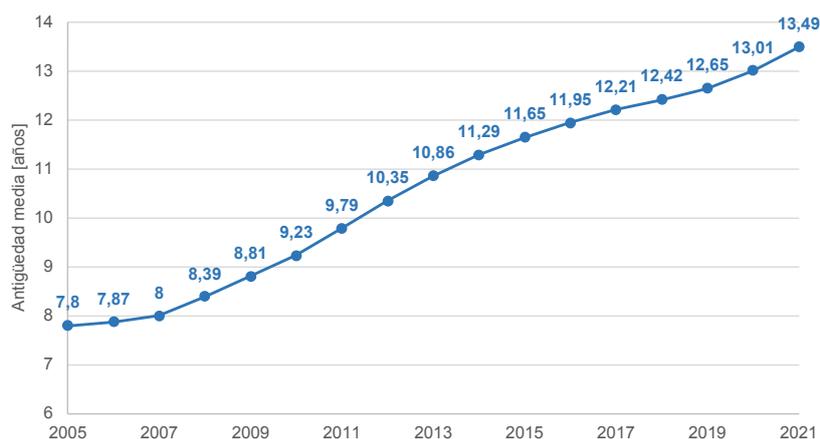


Figura 16. Antigüedad media del parque de vehículos en España [64].

4.4. Escenarios alternativos

A partir del escenario base descrito en el capítulo 4 se han elaborado escenarios alternativos para medir la sensibilidad del modelo frente a cambios en los datos de entrada. En ellos, se modifican los parámetros de entrada con mayor influencia en los resultados.

Contraintuitivamente, los parámetros que mayor peso tienen en la recomendación de una tecnología de propulsión sobre otra son los costes de inversión y no los costes energéticos asociados a su operación.

Primero, debe tenerse en cuenta que la minimización de costes se realiza desde un punto de vista gubernamental, entonces, únicamente se contabilizan los costes de obtención de la energía, no los márgenes de beneficio de los diferentes agentes implicados en la cadena energética. En el caso del hidrógeno, al participar más agentes, es probable que el porcentaje del precio debido a los márgenes de beneficio sea más alto que en la electricidad. Además, como se ha mencionado en la sección 3.1.2, no se valora el coste del despliegue de las hidrogeneras. En un análisis que valore todos estos agentes, puede que se incremente la diferencia de precio entre el hidrógeno y la electricidad, y que gane peso el coste de operación en la recomendación de una tecnología sobre la otra.

Es más barato consumir electricidad que hidrógeno que se haya generado en ese instante a causa de las pérdidas de energía en el electrolizador, estimadas en un 61,6-72,5% [44]. Sin embargo, el hidrógeno puede almacenarse, por lo que se puede producir en las horas en las que la electricidad es más barata, a las cuales va ligado su precio. Debido a la baja eficiencia de la electrólisis inversa, el precio del hidrógeno no crece con el aumento de

la demanda eléctrica al mismo ritmo que el de la electricidad, ya que el precio de la electricidad debe ser considerablemente superior al del hidrógeno para que sea más económico consumir hidrógeno que arrancar una central. Por ello, es posible que, dentro del mismo día, el hidrógeno sea más caro o más barato que la electricidad.

Esto demuestra la cercanía en los costes de operación en la simulación de los FCEV y los BEV que, unida a la similitud de sus costes de mantenimiento (305,76 €/año por FCEV frente a 273 €/año por BEV, véase sección 4.1.3), resulta en que los costes con más influencia en los resultados son los precios de compra de los vehículos.

4.4.1. Escenario con escasez de materias primas para las baterías (EMP)

Los motores eléctricos de los BEV tienen una eficiencia alrededor del 85-90% [65], por ello, su autonomía depende en mayor medida de la aerodinámica y de la capacidad de la batería. La aerodinámica de un vehículo es muy dependiente de su diseño y tamaño, atributos decisivos en la decisión de compra, entonces, es complicado para las marcas mejorar la aerodinámica de sus modelos manteniendo diseños atractivos y prácticos. Por todo ello, la capacidad de las baterías es clave para conseguir autonomías competitivas en los BEV.

El despliegue de los BEV está originando un crecimiento rápido de la demanda de litio, componente principal del electrodo de sus baterías, el cual puede acarrear problemas de suministro en el futuro. “*No creo que la industria de las baterías esté preparada para el tsunami de demanda que está por venir*” declaró en mayo de 2022 Sam Jaffe, vicepresidente de soluciones de baterías de E Source, una empresa de investigación de Colorado, EE. UU. [66]. Según E Source, el precio de las baterías puede crecer un 22% desde 2023 a 2026, para más tarde reducir su precio en un 35% hasta 2031 [66], lo que puede traducirse en un precio de adquisición de los BEV entre 1.500 € y 3.000 € superior al de 2023. El escenario con escasez de materias primas para las baterías (EMP) se elaborará a partir de estos datos.

En cambio, [67] declara que hasta 2030 no hay riesgo de sobredemanda en el sector del litio, aunque sí menciona que será necesario que se anuncien más proyectos de minería para operar a partir de ese año. El escenario base se apoyará en esta publicación y en la hipótesis de que existirán más proyectos de minería a partir de 2030 que aseguren la



producción de litio, mientras que en el escenario EMP se fijará que tampoco se llegarán a anunciar dichos proyectos de minería.

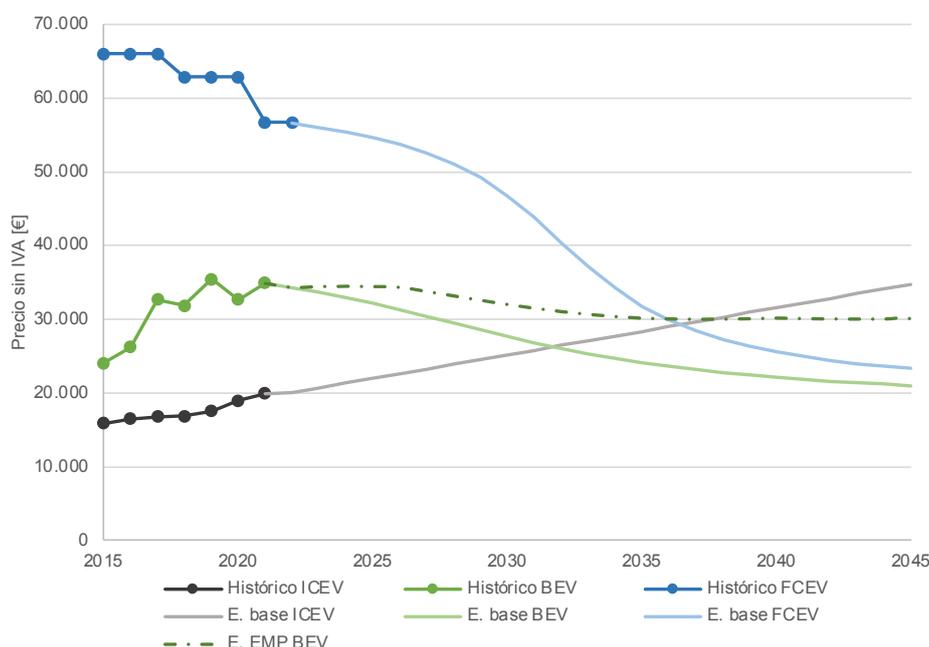


Figura 17. Evolución de precios de venta de los vehículos (escenario EMP) [66].

4.4.2. Escenario con desarrollo tardío de la red de hidrogenas (DTH)

Para ser competitivos, los FCEV necesitan reducir su precio de venta y una red extensa de hidrogenas. El precio de venta se reducirá con en el momento que la producción se incremente (véase sección 4.1.2), el cual será más tardío si la demanda no es la esperada. El principal motivo por el que este escenario puede ocurrir es la lentitud del despliegue de la red de recarga de hidrógeno.

En la actualidad únicamente hay 1 hidrogena abierta al público en la Península Ibérica, en España, y solo se prevé la apertura de 6 nuevas en España y 1 en Portugal antes de 2025 [32]. La compra de un FCEV con una red de recarga tan reducida es difícilmente justificable, pero también lo es la construcción de una hidrogena (inversión de 2,75 millones de € [68]) sin existir un parque de FCEV que demande ese suministro de hidrógeno.

Por ello, es necesario que los gobiernos apoyen el despliegue de los FCEV en forma de ayudas para la construcción de hidrogenas y producción de hidrógeno. En concreto, el Gobierno de España subvencionó la construcción de hidrogenas en los Planes MOVES

Proyectos Singulares I (2019) [69] y II (2021) [70], el Gobierno de Portugal aún no ha lanzado ninguna ayuda de esta índole.

El despliegue del BEV en la Península Ibérica está siendo más lento que en otros países europeos, contabilizándose en junio de 2022 una cuota de mercado del 3,48% [20] y del 10,65% [21], respectivamente, mientras que la media europea en ese mes fue del 12,4% [71]. Tomando estos datos como ejemplo y teniendo en cuenta que las hidrogeneras requieren un CAPEX muy superior al de los puntos de recarga de BEV, es posible que las medidas de estos dos países a favor de la transición hacia el FCEV sean también menos eficaces que en el resto de países europeos, por tanto, el despliegue del FCEV sea más tardío.

Para modelizar este efecto, en el escenario con desarrollo tardío de la red de hidrogeneras (DTH) se retrasará dos años el eje de la función que describe el coste de inversión de los FCEV, de 2032 a 2034. Este eje marca el momento de mayor caída de precio de venta de los FCEV y representa el año con mayor potencial de crecimiento en las ventas de FCEV. De esta forma, este escenario también cubrirá un posible retraso en el desarrollo de la tecnología FCEV.

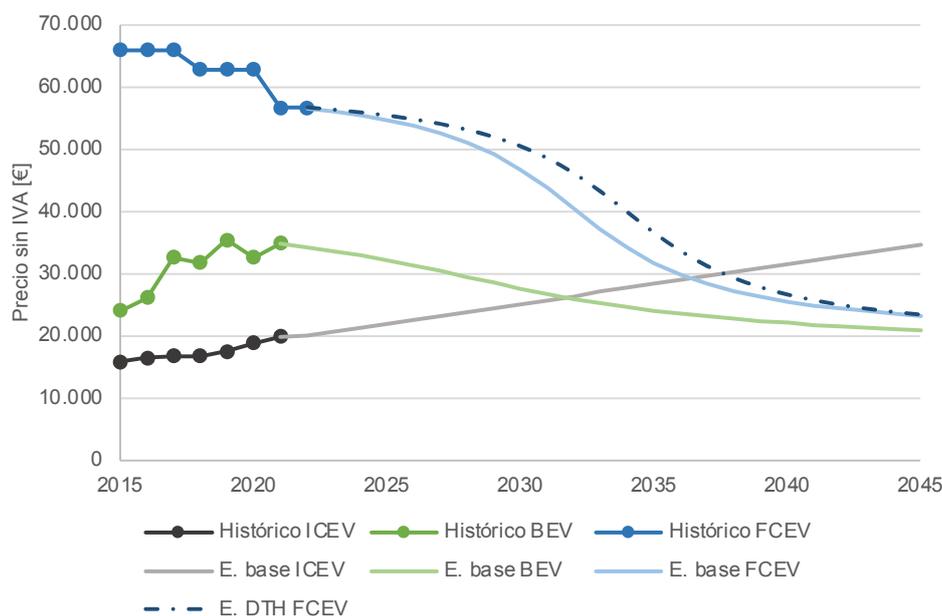


Figura 18. Evolución de precios de venta de los vehículos (escenario DTH).

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la simulación realizada tomando los datos expuestos en el capítulo 4 como escenario base, y comparándolos con los escenarios alternativos diseñados en la sección 4.4.

5.1. Evolución del parque de vehículos

En la **Error! Reference source not found.** y en la **Error! Reference source not found.** se muestran los resultados de la evolución de la penetración de las diferentes tecnologías de propulsión para el escenario base en España y Portugal, respectivamente.

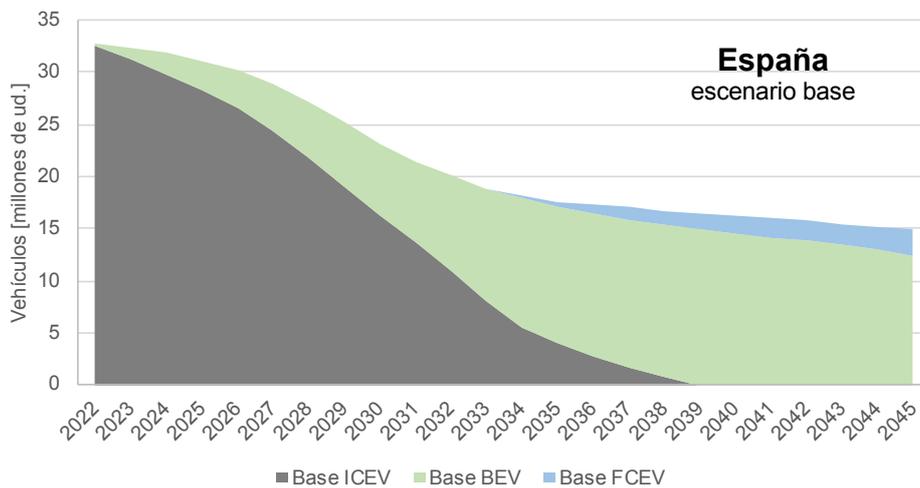


Figura 19. Evolución del parque móvil en España (escenario base).

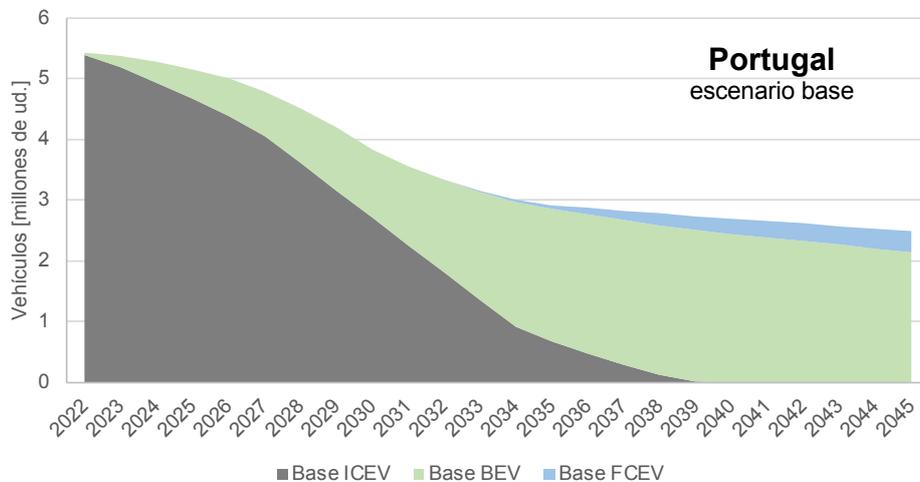


Figura 20. Evolución del parque móvil en Portugal (escenario base).

En el escenario base, los FCEV comenzarán a tener una cuota de mercado significativa a partir de 2033, progresando hasta representar alrededor de un 15% del parque móvil de la Península Ibérica en 2045. Cabe destacar que las previsiones de la cuota de cada tecnología en ambos países son similares, lo que demuestra el mayor peso en los resultados de parámetros comunes entre los países, como el coste de adquisición (igual en España y Portugal), frente a otros parámetros exógenos propios de cada país, como la estructura del parque de generación eléctrico.

Es interesante comprobar cómo la cuota de ICEV se reduce velozmente entre 2022 y 2039. Esto se debe a cuatro factores. Por un lado, se ha considerado que el progresivo endurecimiento de las restricciones anticontaminantes de los vehículos [61] provocará que la dificultad técnica de los motores de los ICEV aumente, incrementando su precio futuro, como se ve en la Figura 10. El impacto de este fenómeno es fuerte, ya que el precio de adquisición es el parámetro con mayor influencia en los resultados, como se explica en la sección 4.4.

Por otro lado, el coste del combustible fijado en [43] provoca que el coste de operación por kilómetro sea superior para los ICEV frente a los BEV. En [43] no se contabilizan los impuestos en el coste del combustible, pero sí los márgenes de las empresas implicadas, en cambio, el precio de la electricidad que ofrece CEVESA se refiere únicamente al coste de explotación del sistema eléctrico, y no contabiliza los márgenes de los diferentes agentes que participan en dicho sistema. Esto provoca que la diferencia entre el coste de operación de los ICEV se incremente en comparación con el de los BEV.

Además, a causa de que el análisis se lleva a cabo desde un punto de vista gubernamental, el coste de las emisiones de CO₂ [72] de los ICEV sí que se contabiliza en la minimización de costes del modelo. Este coste, que va incrementándose con el paso de los años, dificulta la recomendación del ICEV como opción preferente bajo un análisis global, como el que es objeto de este trabajo.

Por último, el coste de mantenimiento de los ICEV proyectado es cercano al doble del de los BEV, como se puede comprobar en la sección 4.1.3. La suma de estos cuatro fenómenos hace que el modelo recomiende acelerar la sustitución de ICEV por BEV desde el momento actual.

En la Figura 21 y en la Figura 22 se muestran los resultados del modelo tras la simulación de los diferentes escenarios de costes explicados en la sección 4.4. En el escenario EMP (Escasez de Materias Primas) se produce un desabastecimiento de las materias primas necesarias para la fabricación de las baterías, lo que provoca un aumento de los precios de venta de los BEV. En el escenario DTH (Desarrollo Tardío del Hidrógeno) se modela un retraso en la puesta en funcionamiento de la red de hidrógeno o del desarrollo de la tecnología FCEV, lo que induce un aumento en los costes de adquisición de los FCEV debido a la inferior demanda. En el escenario EMP+DTH suceden los casos descritos en los escenarios EMP y DTH simultáneamente.

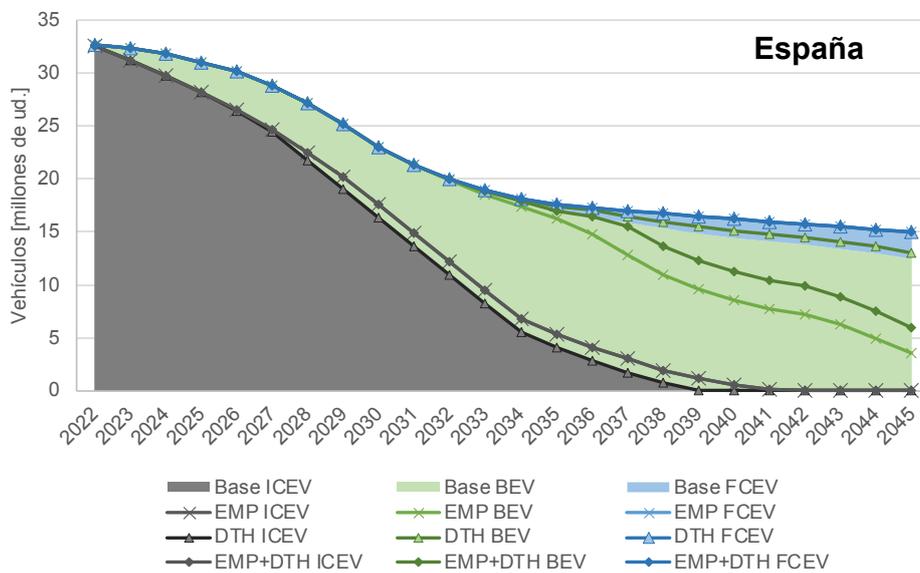


Figura 21. Evolución del parque móvil en España.

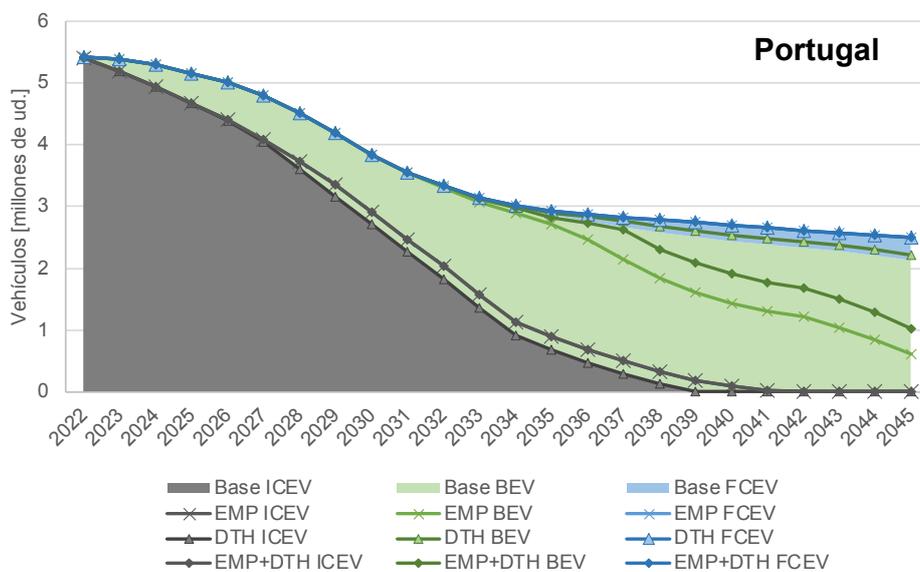


Figura 22. Evolución del parque móvil en Portugal.

La visualización de los resultados en la Figura 21 y en la Figura 22 se basa en la empleada en la Figura 19 y en la Figura 20. Para poder comparar los resultados de los escenarios entre ellos, las áreas que representan su cuota de vehículos están representadas únicamente por las líneas que marcan sus límites, a excepción del escenario base. Por ejemplo, la cuota de BEV del escenario EMP se representa entre las líneas gris y verde con aspas. De tal modo, se puede comprobar que este escenario tiene menor proporción de BEV, ya que el área que marcan las líneas anteriormente mencionadas es menor a la del escenario base.

Todos los escenarios muestran una fuerte disminución de la cuota de los ICEV a partir de 2022 en favor de los BEV. Como se ha explicado en la sección anterior, el mayor coste de operación y emisiones de los ICEV hace que el TCO (coste total de propiedad) de los BEV sea el más barato hasta la irrupción de los FCEV en 2032-2035.

El reparto de cuota entre los BEV y los FCEV sí difiere de una forma clara entre escenarios a partir de 2036. En el escenario EMP, el más desfavorable para los BEV, la velocidad del despliegue de estos vehículos es menor a la del escenario base, tardando 2 años más en reemplazar al ICEV. En este escenario, los BEV alcanzan su máxima penetración en 2035 (66% en España y 63% en Portugal), mientras que en el escenario base su cuota continúa aumentando hasta 2039, llegando a un 90%. Debido al alto coste de adquisición de los BEV en EMP, los FCEV pasan a ser la opción más económica para la mayoría de las flotas a partir de 2036, llegando a una presencia del 75% en 2045.

Estos resultados deben entenderse teniendo en cuenta que el coste de adquisición de los vehículos tiene una influencia en los resultados superior al coste energético debido a la operación de los vehículos. En la sección 4.4 se ha explicado por qué en el modelo ni precio del hidrógeno y de la electricidad ni el coste de mantenimiento tienen la suficiente disparidad como para justificar la compra de un BEV en un escenario en el que su precio de venta es llega a ser 8.000 € más caro.

Aun desarrollándose la red de recarga de hidrógeno más lento de lo esperado, si también se da una falta de materias primas para las baterías (escenario EMP+DTH) los FCEV continuarían siendo la opción más recomendable para la mayoría de las flotas a partir de 2038 (2 años más tarde que en el escenario EMP), logrando una penetración del 58-60% en 2045. Estos resultados son coherentes, ya que en el escenario DTH el descenso de los

precios de los FCEV se lleva a cabo 2 años más tarde que en el escenario base (véase sección 4.4.2).

En conclusión, los resultados cuentan con una robustez alta para el horizonte 2022-2035, ya que hay una baja variabilidad entre escenarios para ese periodo, y muestran que es óptimo que la tasa de recambio de ICEV a BEV aumente en los próximos años. A partir de 2035 la dispersión entre las proyecciones de los distintos escenarios crece a causa de la mayor incertidumbre debido a la distancia en el tiempo y a la potencial volatilidad del desarrollo tecnológico y de infraestructura. Así, la falta de materias primas para la fabricación de las baterías podría ser una variable decisiva para el despliegue de los FCEV: si existe dicha escasez los FCEV sustituirán en la mayoría de usos a los BEV en 2045; si no se da esta situación, los FCEV solamente se utilizarán para un tipo de flotas determinado, con una expansión de cuota de mercado más reducida, aunque significativa.

A continuación, se llevará a cabo un análisis particularizado por flotas para comprobar cómo difiere la recomendación de la tecnología impulsora según las condiciones de uso a las que se someten los vehículos.

5.1.1. Evolución del parque de vehículos por flotas

La flota con una mayor expansión de FCEV es la TaxN50% (véase Tabla 13), que se caracteriza por hacer recorridos de larga distancia en horario nocturno.

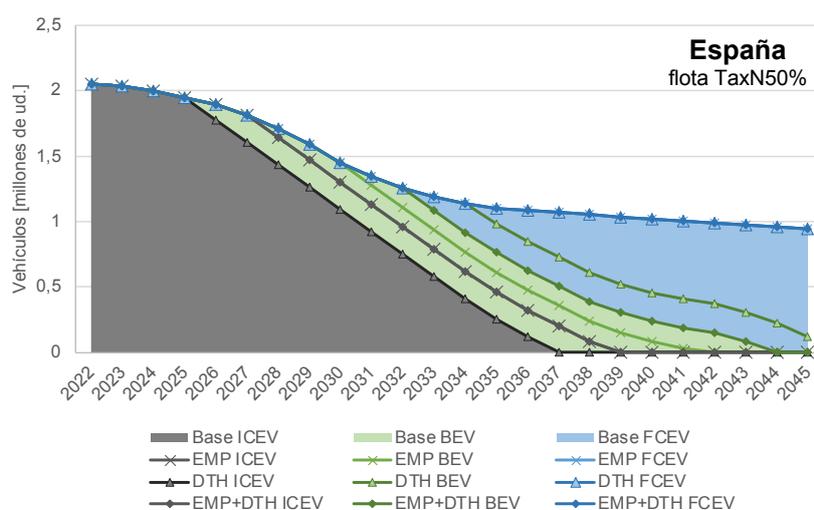


Figura 23. Evolución de la flota TaxN50% en España.

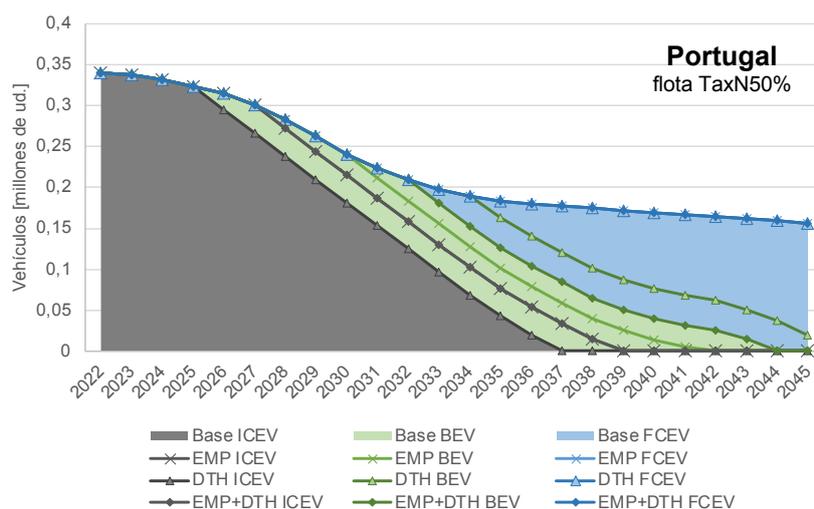


Figura 24. Evolución de la flota TaxN50% en Portugal.

Los resultados de la Figura 23 y de la Figura 24 son coherentes con la realidad, ya que es por la noche cuando los BEV son más baratos de cargar, por tanto, para una movilidad eminentemente nocturna la recarga de BEV es más cara y deja de ser competitiva.

El hidrógeno, al existir el almacenamiento, se puede producir en las horas en las que la electricidad es más barata, a las cuales va ligado su precio. Debido a la baja eficiencia de la electrólisis inversa, el precio del hidrógeno no crece con el aumento de la demanda eléctrica al mismo ritmo que el de la electricidad, ya que el precio de la electricidad debe ser considerablemente superior al del hidrógeno para que sea más económico consumir hidrógeno que arrancar una central. En la simulación, este escenario de precios superiores de la electricidad frente al hidrógeno se produce habitualmente durante el día.

Los BEV únicamente se pueden recargar cuando no son usados, en el caso de esta flota, de día. Por ello, el modelo recomienda para esta flota el uso de FCEV a partir de 2032-2037.

En resumen, los FCEV emergen como la opción más adecuada para flotas con un perfil de uso similar a la flota TaxN50% (largos trayectos nocturnos), en el momento en el que su tecnología esté desarrollada. Para este tipo de movilidad solamente será óptima la utilización de BEV como transición entre los ICEV y los FCEV durante los años en los que la tecnología FCEV no esté aún desarrollada y los ICEV estén demasiado penalizados por sus emisiones contaminantes.

Es interesante analizar también la flota T1.1 (véase Tabla 13), que modela trayectos cortos por la mañana y por la tarde, simulando la ida y la vuelta al trabajo en coche.

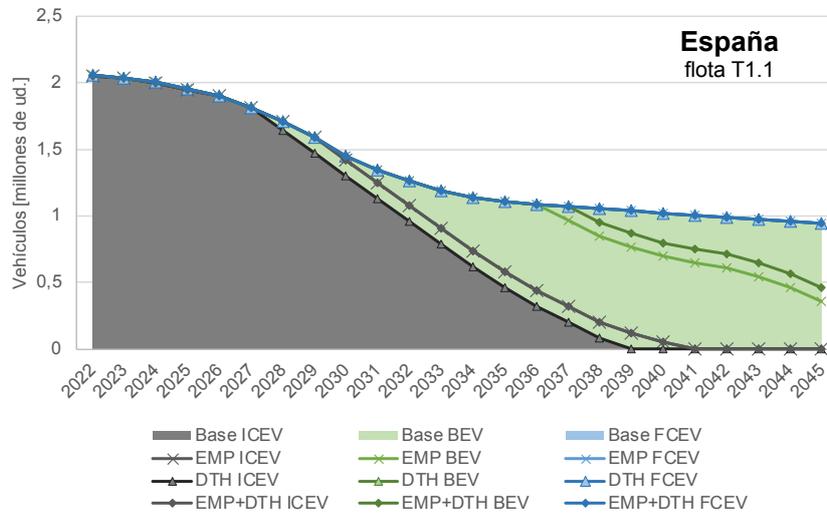


Figura 25. Evolución de la flota T1.1 en España.

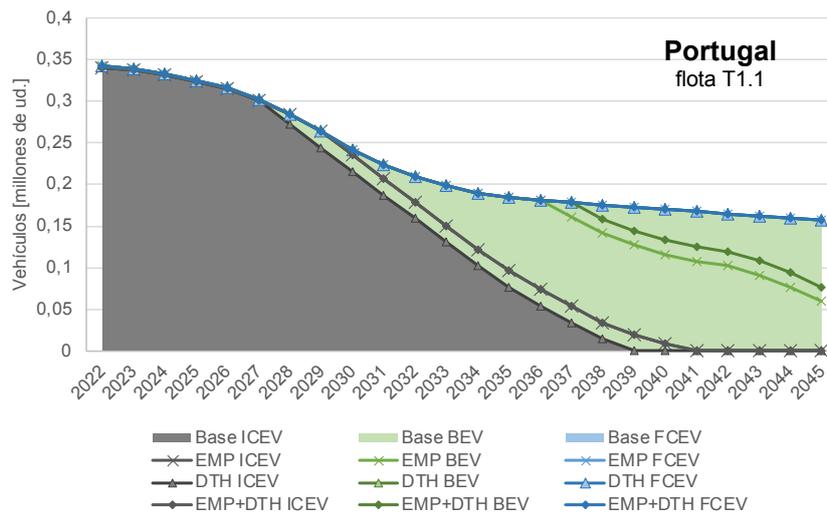


Figura 26. Evolución de la flota T1.1 en Portugal.

No es óptimo que en el escenario base esta flota esté formada por FCEV en el periodo estudiado. Únicamente los FCEV serán una alternativa preferente en caso de que haya falta de materias primas para la fabricación de las baterías de los BEV. No obstante, esta escasez debe perdurar hasta 2037 ó 2038 (dependiendo de si el despliegue de la red de recarga de hidrógeno es rápido o no) para que el uso de FCEV sea recomendable. En contraste, en este mismo escenario para la flota TaxN50% se sugiere el despliegue de los FCEV a partir de 2031 ó 2033 (véase Figura 23 y Figura 24).

Las diferencias entre los resultados obtenidos para las flotas TaxN50% y T1.1. resaltan la importancia que tendrá el tipo de uso del vehículo en la decisión de su compra cuando las tecnologías BEV y FCEV estén suficientemente desarrolladas. Cuanto más largos sean los trayectos y mayor proporción de ellos se realice por la noche, más recomendable será la adquisición de un FCEV, en cambio, para trayectos cortos con posibilidad de recarga nocturna será más coherente la adquisición de un BEV.

5.2. Emisiones de CO₂

5.2.1. Emisiones globales de CO₂

En la Figura 27 y en la Figura 28 se muestran los resultados del cálculo de las emisiones totales anuales de CO₂ conjuntas del sistema eléctrico y el transporte para cada uno de los escenarios descritos en la sección 4.4, individualizados para España y Portugal, respectivamente. El límite de emisiones de CO₂, señalado con una línea roja de puntos, representa la ruta hacia el objetivo de emisiones de 2050 de la Unión Europea [14]. Para construirlo, se ha creado una línea recta entre el dato de emisiones de 2022 y el objetivo de emisiones de 2050, de forma análoga a la realizada en [43].

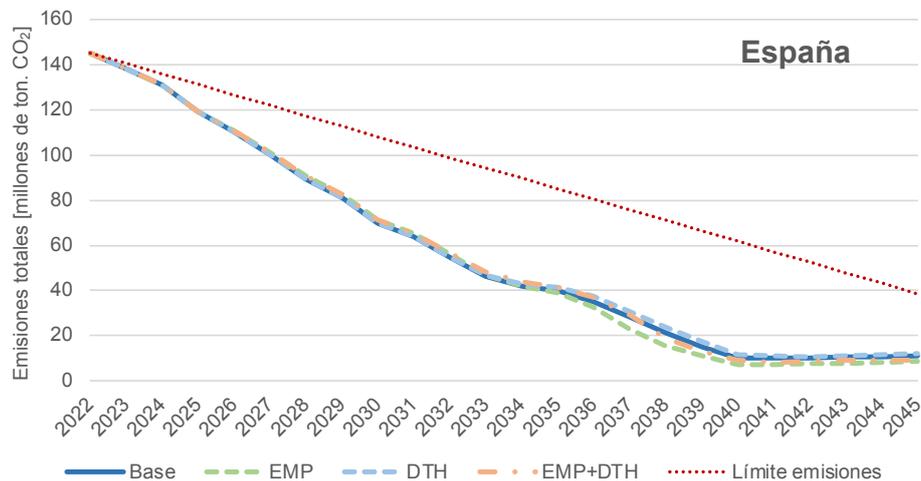


Figura 27. Evolución de las emisiones totales de CO₂ en España.

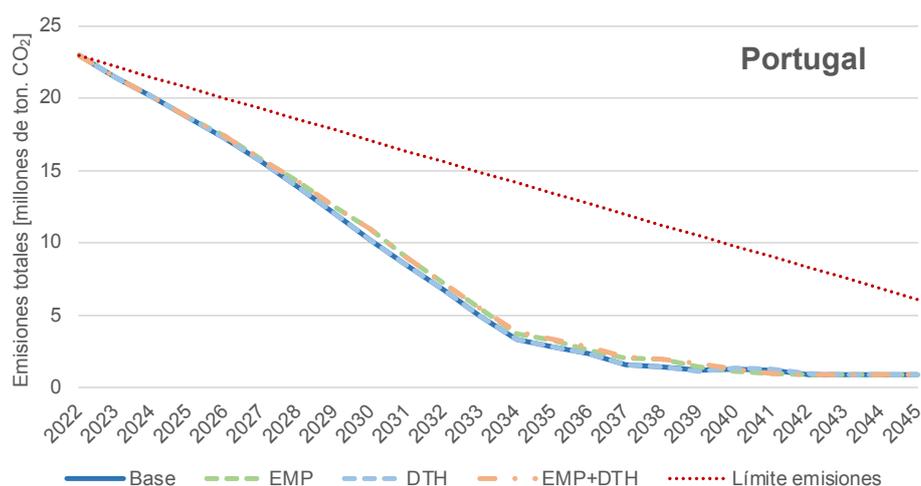


Figura 28. Evolución de las emisiones totales de CO₂ en Portugal.

Bajo todos los escenarios analizados se estima que las emisiones totales de CO₂ se reducirán alrededor de un 50% en 2030 y un 90% en 2040 si se cumplen las previsiones de la evolución del parque móvil mostradas en la Figura 21 y en la Figura 22.

Esta disminución tan severa se debe a la reducción del parque de ICEV que se lleva a cabo en todos los escenarios. Las emisiones del tubo de escape de los ICEV representan la mayor parte de las emisiones de CO₂ registradas por el modelo. En concreto, la simulación del escenario base señala que en 2022 las emisiones debidas a la operación de ICEV representarán el 90% del total de emisiones. Este dato coincide con la reducción de emisiones lograda para el año 2040, cuando se estima que la cuota de ICEV sea virtualmente nula. Si no se llevara a cabo la transición hacia la movilidad cero emisiones, no sería posible seguir la ruta de emisiones marcada por la Unión Europea.

Por otro lado, la evolución de la emisión de contaminantes es similar en todos los escenarios, lo cual resalta la baja sensibilidad de estos resultados a los cambios en los datos de entrada de los diferentes escenarios.

5.2.2. Emisiones de CO₂ en la generación de electricidad

La demanda de energía eléctrica que podría implicar el despliegue de los BEV y FCEV puede conllevar a un aumento de las emisiones en la generación eléctrica debido a la necesidad de utilizar grupos más caros y contaminantes para cubrirla. Dicha sobredemanda no se distribuirá horariamente de igual modo para ambas tecnologías de propulsión: los BEV se cargarán cuando no estén en uso, mientras que los FCEV se podrán recargar en cualquier

momento debido a su menor tiempo de recarga y a la capacidad de almacenamiento del hidrógeno, lo que permite que el hidrógeno necesario para el movimiento de los FCEV se puede producir cuando la energía sea más barata y limpia, con independencia del momento de recarga de los FCEV.

La Figura 29 y la Figura 30 muestran la evolución de las emisiones de CO₂ debidas a la generación de electricidad en el horizonte temporal analizado para España y Portugal, respectivamente.

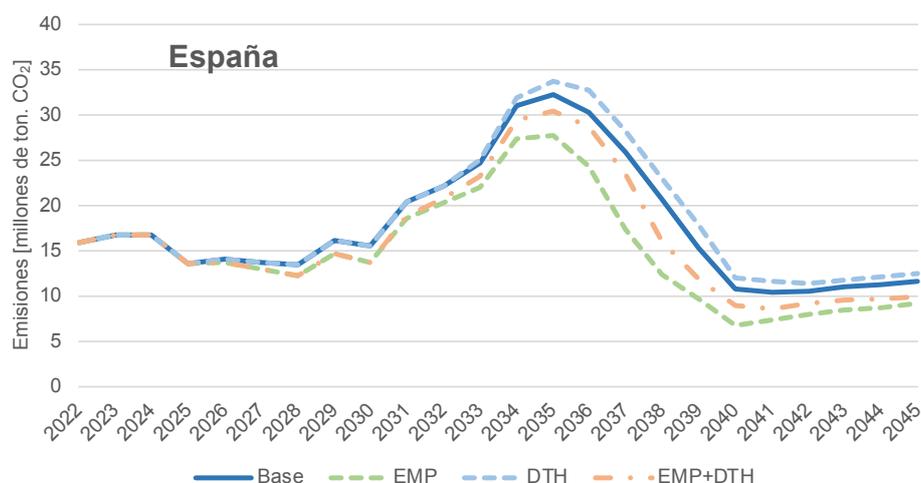


Figura 29. Evolución de las emisiones de CO₂ por producción eléctrica en España.

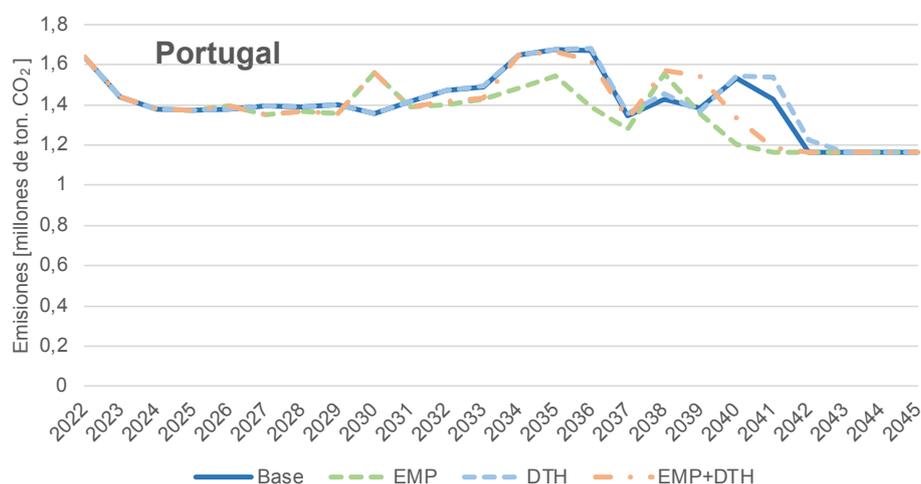


Figura 30. Evolución de las emisiones de CO₂ por producción eléctrica en Portugal.

La evolución de las emisiones en la generación sí presenta diferencias significativas en su forma entre España y Portugal. Esto se debe a las diferencias entre la estructura de los parques de generación eléctrica de los dos países. Portugal cuenta con un mayor porcentaje renovable en el mix energético [73] [74], por ello, la sobredemanda por el despliegue de los

BEV puede cubrirse con este tipo de tecnología y las emisiones en la generación no suben con el paso del tiempo. Además, la tasa de motorización de Portugal es menor a la española, contando con 0,527 coches/habitante contra 0,689 coches/habitante en España [19] [75], lo que permite que el crecimiento de la demanda debida a los BEV no sea tan drástica.

En la Figura 29 se puede comprobar como las emisiones de CO₂ debidas a la generación eléctrica disminuyen en España a partir de 2035. En las simulaciones, en 2036 el parque de ICEV está ya virtualmente sustituido por ZEV, entonces, el incremento interanual de la demanda eléctrica a partir de ese año se reduce. A este fenómeno se debe sumar el crecimiento de generación renovable proyectado dentro de los parámetros exógenos de CEVESA a partir de ese año. El resultado de la combinación de estos dos factores es la reducción de emisiones vista en la Figura 29.

Por otro lado, la Figura 29 y la Figura 30 sí coinciden en que el escenario en el que las emisiones son menores en la generación es el EMP, es decir, el que tiene mayor penetración de FCEV (véase Figura 21 y Figura 22). El almacenaje de hidrógeno dentro del sistema le otorga a este vector energético mayor flexibilidad en su generación, permitiendo producir al máximo en las horas valle y consiguiendo dos objetivos: generar hidrógeno en las horas más baratas y aplanar la demanda eléctrica optimizando su generación. El momento de carga de los BEV, aun pudiendo ser en horario nocturno (históricamente el más económico), depende exclusivamente de los hábitos de los conductores. Los BEV se enchufan a la red cuando se puede, no cuando se requiere, reduciéndose así la eficiencia del sistema.

Por tanto, cuanto mayor sea la cuota de FCEV dentro de los ZEV, menores serán las emisiones globales del sistema bajo las hipótesis consideradas en este análisis.

5.3. Precio de la electricidad

Aunque se espera que el despliegue de la generación renovable reduzca los precios en el mercado marginalista al ser su coste variable nulo, la provisión de reserva podría aumentar los costes del sistema para hacer frente a los posibles errores de estimación de la producción renovable, debidos a la naturaleza marcadamente aleatoria de la meteorología.

Por otro lado, como se ha mencionado en la sección 5.2, la penetración de los BEV y los FCEV supone una carga extra para el sistema eléctrico, lo que puede aumentar la demanda y los precios en el mercado marginalista, aunque también, la recarga de los BEV y la producción de hidrógeno puede realizarse en horas valle, consiguiéndose así aplanar la curva de la demanda y reducir en costes de arranque y parada de las centrales.

En la Figura 31 y en la Figura 32 se muestran los resultados de la previsión de precios de la electricidad para el periodo 2022-2045, individualizados para España y Portugal, respectivamente. Cabe destacar que estos precios muestran únicamente el coste de la producción de electricidad, no el resto de costes asociados al precio de la luz.

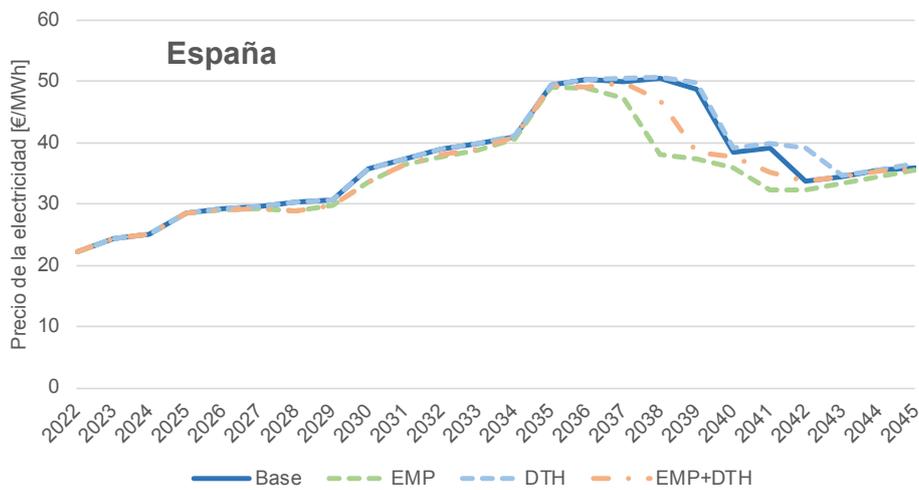


Figura 31. Evolución del precio de la electricidad en España.

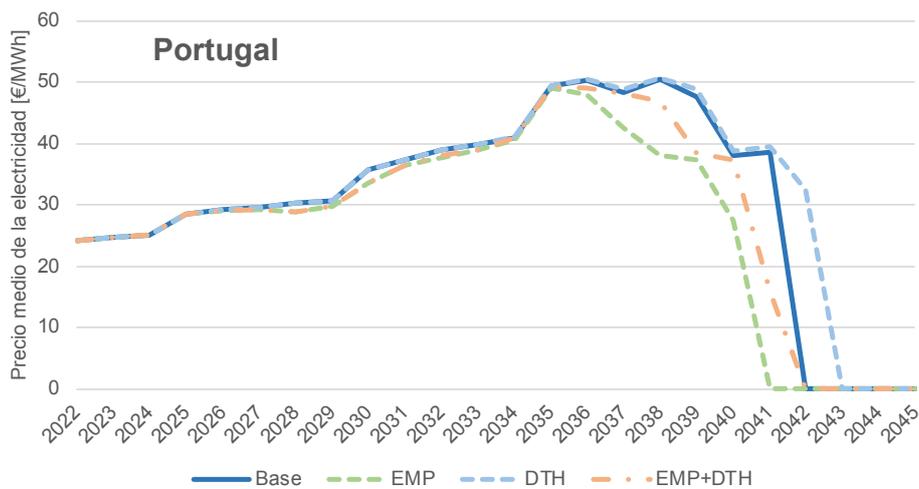


Figura 32. Evolución del precio de la electricidad en Portugal.

Se puede comprobar que las diferencias en los parámetros de entrada entre los escenarios tienen poca influencia en el precio de la electricidad en el periodo 2022-2035. En

ese periodo, los precios van progresivamente aumentando, manteniéndose ligeramente por debajo los precios de los escenarios EMP y EMP+DTH a causa del mayor porcentaje de ICEV, que hace que la demanda de electricidad sea menor. No obstante, se considera que esta diferencia no es significativa, ya que la sobredemanda apenas afecta al precio de la electricidad.

A partir de 2035, momento en el que los FCEV irrumpen en el mercado de forma dispar entre los escenarios, se encuentran las mayores diferencias. Los escenarios que tienen menores precios son aquellos con menor penetración de BEV y, por ende, mayor penetración de FCEV. Esto es debido a la inflexibilidad de los BEV a la hora de elegir el momento de su recarga, y concuerda con lo explicado en la sección 5.2.2.

Es especialmente interesante comprobar cómo en los últimos años los precios de la electricidad no son iguales en los casos de España y Portugal. Esto indica que a partir de ese momento el límite de la interconexión entre estos dos países se ha saturado, por tanto, se debería aumentar más para lograr el objetivo de interconexión máxima para que la proyección de la futura estructura de generación no afecte a los resultados de la evolución del parque móvil.

Además, en el caso de Portugal, la electricidad tiene en los últimos años precios nulos (véase Figura 32). Este fenómeno únicamente se puede producir debido al completo abastecimiento de la demanda por parte de energía renovable que, como se ha mencionado anteriormente, tiene coste variable nulo. Portugal, que es un país con un alto porcentaje de producción renovable, ya ha experimentado este fenómeno en momentos puntuales [73] [74]. Sin embargo, este completo abastecimiento de la demanda en Portugal por parte de las energías renovables no concuerda con los resultados de la Figura 30, ya que las emisiones de CO₂ a partir de ese momento deberían de ser también nulas. Por ello, los datos que rigen la interconexión y la capacidad instalada de Portugal a partir del año 2041 deben ser revisados.

No obstante, analizando la Figura 21, la Figura 22, la Figura 23, la Figura 24, la Figura 25 y la Figura 26 de la sección 5.1 puede comprobarse que no hay diferencias significativas en los resultados del parque de vehículos de España y Portugal a partir del año 2041. Por ello, se considera que esta anomalía no supone una alteración suficiente como para rechazar la simulación de Portugal.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un modelo lineal de minimización de costes que simula la operación combinada de los sistemas eléctrico, hidrógeno y transporte de la Península Ibérica, cumpliendo con los objetivos medioambientales de la Unión Europea [53]. El detalle horario del modelo permite considerar las interacciones entre los agentes de los tres sistemas para lograr una simulación lo más próxima a la realidad con la que evaluar el potencial impacto futuro de las políticas de descarbonización.

El trabajo ha enfocado su análisis en el reparto del futuro parque de vehículos de España y Portugal según la tecnología del grupo motopropulsor (ICEV, BEV o FCEV) para el periodo 2022-2045, valorando sus costes de inversión, operación, mantenimiento y emisiones, y su implicación tanto en el sistema de generación eléctrica como en el de hidrógeno. El fuerte desarrollo actual de las tecnologías BEV y FCEV incrementa la incertidumbre del modelo; por ello, se han desarrollado una serie de escenarios alternativos con los que probar la sensibilidad del modelo y la robustez de sus resultados. Lógicamente, la predicción solo pretende proporcionar sendas aproximadas de la evolución de las diferentes tecnologías de movilidad que permitan comparar y analizar los escenarios considerados, como base para la ayuda a la toma de decisiones regulatorias en lo relativo a la movilidad libre de emisiones.

Se ha presentado la programación de forma transparente para que el modelo creado en este trabajo pueda ser implementado de forma sencilla en otras aplicaciones que puedan lograr más avances en este campo, además de para que pueda ser entendido por futuros proyectistas que deseen añadir nuevos módulos a CEVESA.

Del trabajo se han extraído siete conclusiones principales:

1. **Los FCEV tendrán una cuota de mercado significativa a partir de 2035.** En todos los escenarios las ventas de FCEV crecerán durante la segunda mitad de la década de 2030, logrando un porcentaje significativo dentro de la flota total a partir de 2037-2038.
2. **Una alta penetración de FCEV reduce el coste de la electricidad y las emisiones en su generación.** El proceso por el que pasa la electricidad utilizada por los motores de los FCEV es menos eficiente que el de los BEV: desde la red eléctrica se convierte

en hidrógeno en los electrolizadores para, más tarde, volver a ser electricidad tras pasar por la pila de combustible de los FCEV. Sin embargo, estas pérdidas son compensadas por el aumento de eficiencia que aporta este proceso al sistema de generación eléctrica. Como el hidrógeno puede almacenarse, hay total libertad horaria para hacer funcionar los electrolizadores, entonces, puede programarse que estos operen cuando sea necesario para optimizar el sistema y ahorrar costes de arranque y parada de las centrales. Los electrolizadores, además, pueden consumir la sobreproducción renovable generada en momentos favorables para estas plantas, ayudando así a la expansión de este tipo de centrales.

3. **La velocidad del despliegue de los FCEV depende en gran medida del suministro de materias primas para las baterías.** Si en el futuro se da una escasez en las materias primas de los componentes necesarios para la creación de las baterías, como el litio, los BEV no serán tan competitivos como se prevé y, cuando la tecnología de los FCEV esté suficientemente desarrollada (alrededor de 2035 según el modelo), deberán ser sustituidos a un ritmo alto. En cambio, si esa escasez no sucede, los FCEV únicamente serán interesantes para algunos usos eminentemente nocturnos y de largo recorrido.
4. **El tipo de uso de los vehículos será un factor importante en la decisión de compra entre BEV o FCEV.** A partir de 2035, cuando los FCEV se encuentren a un nivel de desarrollo que los haga competitivos, los conductores deberán estudiar cuál es el tipo de uso que hacen de su vehículo para decidir entre un BEV y un FCEV. Los FCEV se recomendarán para usos nocturnos o de largo recorrido, mientras que los BEV serán más apropiados para usos urbanos diarios.
5. **Es posible alcanzar los objetivos de emisiones de CO₂ en España y Portugal.** En todos los escenarios simulados se cumple con la senda hacia los objetivos de emisiones de 2050 impuestos por la Unión Europea gracias al rápido recambio de ICEV por ZEV que se desarrolla en todos los escenarios analizados. Por ello, se concluye con que es posible alcanzar los objetivos de emisiones impuestos por la Unión Europea si se realiza una gestión óptima de la inversión en generación eléctrica y de la electrificación de la flota de vehículos.
6. **El despliegue de los BEV y FCEV será similar en España y Portugal en términos relativos.** Todos los resultados, a excepción de las emisiones en la generación eléctrica, son parecidos en su forma en España y Portugal, y son coherentes: por un

lado, el parámetro con más peso en la penetración de las diferentes tecnologías de los vehículos (el precio de venta de los vehículos) es igual para ambos países. Por otro lado, como no se han limitado los intercambios de electricidad entre España y Portugal, no hay *market splitting*, entonces, los precios de la electricidad son iguales, con excepción del periodo 2041-2045, el cual debe ser revisado para Portugal. El parque de producción eléctrica sí es distinto en España y Portugal, por lo que es coherente que los resultados de emisiones de CO₂ difieran entre los dos países.

7. **El modelo propone acelerar la sustitución de ICEV por BEV desde el momento actual.** Todos los escenarios recomiendan el recambio a partir de 2022 de los ICEV por BEV, con mayor o menor velocidad según el tipo de flota. En el escenario más desfavorable, se debe llegar a la desaparición virtual de los ICEV en 2041.

El modelo propuesto tiene potencial para convertirse en una herramienta para evaluar el impacto de políticas reguladoras y de subvenciones en la transición hacia la movilidad eléctrica en España y Portugal. Para poder llegar a serlo, son necesarios desarrollos en las siguientes áreas en proyectos futuros, además de resolver la anomalía de los resultados de los precios de Portugal para el periodo 2041-2045:

- Incluir la consideración de tecnologías híbridas de propulsión, como son los MHEV (híbridos ligeros de combustión-eléctricos de baterías), HEV (híbridos de combustión-eléctricos de baterías), PHEV (híbridos enchufables de combustión-eléctricos de baterías) y vehículos de gas, así como la discriminación entre motores diésel y motores gasolina dentro de los ICEV y todos los híbridos.
- Posibilitar el uso de combustibles sintéticos por los ICEV (y los híbridos), y modelar su sistema de generación debido a que su fabricación implica un alto gasto de electricidad.
- Valorar el coste de la expansión de las hidrogeneras y analizar su impacto en las ventas de FCEV.
- Calcular las emisiones en la fabricación de los vehículos según su tecnología de propulsión.
- Modelizar aspectos culturales y sociales como las preferencias de los consumidores en la compra de los vehículos y el posible rechazo que pueden tener a nuevas tecnologías, de forma similar a como se realiza en [48].

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de abril de 2019, por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, y por el que se derogan los Reglamentos (CE) n.º 443/2009 y (UE) n.º 510/2011 (Texto pertinente a efectos del EEE.)*, vol. 111. 2019. Accedido: 16 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj/spa>
- [2] elEconomista.es, «Volkswagen invertirá 46.000 millones de euros para liderar las ventas de vehículos eléctricos». <https://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/11106688/03/21/Volkswagen-invertira-46000-millones-de-euros-para-liderar-las-ventas-de-vehiculos-electricos.html> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [3] R. Sobrino, «Stellantis se lanza por la electrificación de los vehículos comerciales», *Cinco Días*, 12 de noviembre de 2021. https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/11/12/companias/1636701944_124238.html (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [4] «Renault busca que sus coches eléctricos sean más rentables que los diésel para 2025 | Compañías | Cinco Días». https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/06/30/companias/1625066465_681178.html (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [5] P. Soler, «Mercedes-Benz invertirá más de 40.000 M en desarrollar vehículos eléctricos hasta 2030», *elconfidencial.com*, 22 de julio de 2021. https://www.elconfidencial.com/empresas/2021-07-22/mercedes-benz-invertira-mas-de-40-000-m-en-desarrollar-vehiculos-electricos-hasta-2030_3197240/ (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [6] M. Garduño, «Adiós a la gasolina, BMW apuesta más de 1,000 mde al impulso de autos eléctricos», *Forbes México*, 7 de septiembre de 2021. <https://www.forbes.com.mx/negocios-adios-gasolina-bmw-apuesta-1000-mde-impulso-autos-electricos> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [7] «Toyota group beefs up development of fuel-cell vehicle parts | The Japan Times». <https://www.japantimes.co.jp/news/2021/01/24/business/corporate-business/toyota-fuel-cell-vehicle-parts/> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [8] «Hyundai Motor Group reveals “FCEV Vision 2030”». <https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-motor-group-reveals-fcev-vision-2030.html> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [9] «Honda, GM invest \$85 million in fuel cell production», *evo*.

- <https://www.evo.co.uk/news/18781/honda-gm-invest-85-million-in-fuel-cell-production> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [10] elEconomista.es, «El coche eléctrico llega solo al 2%, tres veces menos que en Europa». <https://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/11364986/08/21/El-coche-electrico-llega-solo-al-2-tres-veces-menos-que-en-Europa.html> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [11] E. Martín, «En España solo hay 15 coches de hidrógeno y ni una hidrogenera pública: estas son las medidas que proponen para cambiarlo», *Motorpasión*, 27 de octubre de 2021. <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/espana-solo-hay-15-coches-hidrogeno-hidrogenera-publica-estas-medidas-que-proponen-para-cambiarlo> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [12] «BOE.es - BOE-A-2021-8447 Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.» <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-8447#a1> (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [13] «Un Pacto Verde Europeo», *Comisión Europea - European Commission*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (accedido 3 de diciembre de 2021).
- [14] «Greenhouse gas emission statistics - emission inventories». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories (accedido 17 de agosto de 2022).
- [15] D. M. Smith *et al.*, «Robust skill of decadal climate predictions», *Npj Clim. Atmospheric Sci.*, vol. 2, n.º 1, Art. n.º 1, may 2019, doi: 10.1038/s41612-019-0071-y.
- [16] «Contaminación atmosférica». <https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution> (accedido 27 de julio de 2022).
- [17] «La Moncloa. 13/07/2021. El Gobierno promoverá el diseño y uso del vehículo eléctrico con una inversión público-privada de 24.000 millones de euros [Consejo de Ministros/Resúmenes]». <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/resumenes/Paginas/2021/130721-cministros.aspx> (accedido 27 de julio de 2022).
- [18] «Fundo Ambiental: 10 milhões de euros de apoio para mobilidade suave e veículos eléctricos». <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/comunicado?i=fundo-ambiental-10-milhoes-de-euros-de-apoio-para-mobilidade-suave-e-veiculos-eletricos> (accedido 27 de julio de 2022).
- [19] Pamela, «Passenger car registrations in Europe 1990-2021, by country», *ACEA - European Automobile Manufacturers' Association*, 1 de mayo de 2022. <https://www.acea.auto/figure/passenger-car-registrations-in-europe-since-1990-by-country/>

(accedido 25 de julio de 2022).

- [20] «ANFAC». <https://anfac.com/> (accedido 12 de julio de 2022).
- [21] «ACAP | Home». <https://acap.pt/pt/home> (accedido 27 de julio de 2022).
- [22] J. Muelaner, «EV battery technologies: From the state of the art to the future energy stores», *Battery Power Tips*, 24 de febrero de 2022. <https://www.batterypowertips.com/ev-battery-technologies-from-the-state-of-the-art-to-the-future-energy-stores-faq-2/> (accedido 1 de agosto de 2022).
- [23] «EQS de Mercedes-EQ: catálogo y lista de precios». <https://www.mercedes-benz.es/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqs/saloon-v297/leasing-and-offers.html> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [24] «Así es la curva de carga rápida del nuevo Mercedes EQS», *forococheselectricos*, 14 de abril de 2021. <https://forococheselectricos.com/2021/04/curva-carga-rapida-mercedes-eqs.html> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [25] Reuters, «Taiwan battery maker ProLogium signs investment deal with Mercedes-Benz», *Reuters*, 27 de enero de 2022. Accedido: 30 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.reuters.com/markets/deals/taiwan-battery-maker-prologium-signs-investment-deal-with-mercedes-benz-2022-01-27/>
- [26] Reuters, «Battery maker Factorial Energy enters investment deal with Daimler, Stellantis», *Reuters*, 30 de noviembre de 2021. Accedido: 30 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.reuters.com/markets/europe/battery-maker-factorial-energy-enters-investment-deal-with-daimler-stellantis-2021-11-30/>
- [27] «BMW Group Strengthens Leadership Position in Battery Technology with Investment in Solid-State Innovator Solid Power». <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0331495EN/bmw-group-strengthens-leadership-position-in-battery-technology-with-investment-in-solid-state-innovator-solid-power?language=en> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [28] «Volkswagen increases stake in QuantumScape», *Volkswagen Newsroom*. <https://www.volkswagen-newsroom.com:443/en/press-releases/volkswagen-increases-stake-in-quantumscape-6136> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [29] N. Winton, «Solid-State Batteries Promise Electric Car Popularity Boost, But Technical Mountains Await», *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/neilwinton/2021/11/28/solid-state-batteries-promise-electric-car-popularity-boost-but-technical-mountains-await/> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [30] «FCHO», *Tableau Software*. https://public.tableau.com/views/FCHO_15995625131910/NewFCEVperCountry?:embed



=y&:showVizHome=no&:host_url=https%3A%2F%2Fpublic.tableau.com%2F&:embed_code_version=3&:tabs=no&:toolbar=no&:showAppBanner=false&:display_spinner=no&:loadOrderID=0 (accedido 27 de julio de 2022).

- [31] «Barriers to the adoption of fuel cell vehicles: a qualitative investigation into early adopters attitudes», *University of Birmingham*. <https://research.birmingham.ac.uk/en/publications/barriers-to-the-adoption-of-fuel-cell-vehicles-a-qualitative-inve/fingerprints/> (accedido 26 de agosto de 2022).
- [32] «Hidrogeneras», *Gasnam*. <https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-hidrogeneras/> (accedido 27 de julio de 2022).
- [33] «5 Things to Know When Filling Up Your Fuel Cell Electric Vehicle», *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/articles/5-things-know-when-filling-your-fuel-cell-electric-vehicle> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [34] «Todo sobre Hyundai NEXO, el primer coche de hidrógeno de España». <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/todo-sobre-hyundai-nexo-primer-coche-hidrogeno-espana> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [35] «“Hydrogen will make ranges of up to 1,000 kilometers possible in the future”». <https://www.dachser.com/en/mediaroom/Hydrogen-will-make-ranges-of-up-to-1000-kilometers-possible-in-the-future-9587.php> (accedido 30 de marzo de 2022).
- [36] «Toyota Mirai bate el récord mundial al superar los 1.000 km con un depósito de hidrógeno», *Toyota Mirai bate el récord mundial al superar los 1.000 km con un depósito de hidrógeno*. <https://prensa.toyota.es/toyota-mirai-bate-el-record-mundial-al-superar-los-1000-km-con-un-deposito-de-hidrogeno/> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [37] «Hypermiling definición y significado | Diccionario Inglés Collins». <https://www.collinsdictionary.com/es/diccionario/ingles/hypermiling> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [38] «Una nueva realidad del hidrógeno: Combustible del viento y el agua», *siemens-energy.com Global Website*. <https://www.siemens-energy.com/mx/es/soluciones/energia-renovable/soluciones-de-hidrogeno/haru-oni.html> (accedido 29 de julio de 2022).
- [39] «Gasoline consumption by country, around the world», *TheGlobalEconomy.com*. https://www.theglobaleconomy.com/rankings/gasoline_consumption/ (accedido 29 de julio de 2022).
- [40] S. Doménech y J. Villar, «Synthetizing Representative Periods for Chronological Hourly Electricity Generation Expansion Models», en *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, jun. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2018.8469942.
- [41] J. Villar, C. A. Diaz, J. Arnau, y F. A. Campos, «Impact of plug-in-electric vehicles



- penetration on electricity demand, prices and thermal generation dispatch», presentado en European Energy Market (EEM), 2012 9th International Conference on the, Florence, Italy, may 2012. doi: 10.1109/EEM.2012.6254808.
- [42] J. Villar, I. Trigo, C. A. Díaz, y P. Gonzalez, «Cost-benefit analysis of plug-in electric vehicles penetration», en *2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, may 2013, pp. 1-8. doi: 10.1109/EEM.2013.6607287.
- [43] R. Castanon, F. A. C. Fernandez, S. D. Martinez, y J. V. Collado, «An Electricity Generation Expansion Model with ICEV and PEV Investments», presentado en 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), jun. 2018. doi: 10.1109/EEM.2018.8469772.
- [44] B. Álvarez y A. María, «Impact of the hydrogen economy on the electricity sector», 2021, Accedido: 14 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/47790>
- [45] A. Creti, A. Kotelnikova, G. Meunier, y J.-P. Ponsard, «A cost benefit analysis of fuel cell electric vehicles», -, Research Report, feb. 2015. Accedido: 16 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01116997>
- [46] B. Cox, C. Bauer, A. Mendoza Beltran, D. P. van Vuuren, y C. L. Mutel, «Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios», *Appl. Energy*, vol. 269, p. 115021, jul. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115021.
- [47] P. E. Dodds y P. Ekins, «A portfolio of powertrains for the UK: An energy systems analysis», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n.º 26, pp. 13941-13953, sep. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.128.
- [48] H. Blanco, J. J. Gómez Vilchez, W. Nijs, C. Thiel, y A. Faaij, «Soft-linking of a behavioral model for transport with energy system cost optimization applied to hydrogen in EU», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, p. 109349, nov. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109349.
- [49] Anonymous, «The JRC-EU-TIMES model», *EU Science Hub - European Commission*, 18 de octubre de 2017. <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/jrc-eu-times-model-assessing-long-term-role-energy-technologies> (accedido 26 de noviembre de 2021).
- [50] B. CATTANEO, «Powertrain Technology Transition Market Agent Model (PTTMAM)», *EU Science Hub - European Commission*, 27 de septiembre de 2018. <https://ec.europa.eu/jrc/en/pttmam> (accedido 26 de noviembre de 2021).
- [51] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accedido 23 de noviembre de 2021).

- [52] P. González, J. Villar, F. A. Campos, y C. A. Díaz, «Hourly energy and reserve joint dispatch with a hydro-thermal technological based representation», presentado en European Energy Market (EEM), 2013 10th International Conference on the, may 2013.
- [53] «Estrategia a largo plazo para 2050». https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_es (accedido 13 de junio de 2022).
- [54] «Revista de coches, novedades y pruebas de coches. Reportajes, noticias y artículos técnicos. - km77.com». <https://www.km77.com/> (accedido 12 de julio de 2022).
- [55] «Estadística del impuesto de matriculación Avance Mensual : Diciembre: Matriculación de vehículos por origen y valor del vehículo matriculado Año: 2021 , Periodo: Acumulado , Tramos Base Imponible: Total». https://www.agenciatributaria.es/AEAT/Contenidos_Comunes/La_Agencia_Tributaria/Estadisticas/Publicaciones/sites/matriculaciones/mes/jrubikf1f0551dfc94165d888f582527f68326c40845dcd.html (accedido 12 de julio de 2022).
- [56] «Toyota Mirai (2015) | Información general - km77.com». <https://www.km77.com/coches/toyota/mirai/2015/4-puertas/informacion> (accedido 8 de marzo de 2022).
- [57] «Hyundai NEXO (2018) | Precio y ficha técnica - km77.com». <https://www.km77.com/coches/hyundai/nexo/2018/estandar/estandar/nexo/datos> (accedido 8 de marzo de 2022).
- [58] «Toyota Mirai (2021) | Información general - km77.com». <https://www.km77.com/coches/toyota/mirai/2021/estandar/informacion> (accedido 8 de marzo de 2022).
- [59] «Toyota Mirai fuel cell rated with EPA-estimated 67 mpge», *Green Car Congress*. <https://www.greencarcongress.com/2015/06/20150630-mirai.html> (accedido 8 de marzo de 2022).
- [60] Hydrogen Council, «Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective.» 20 de enero de 2020. Accedido: 23 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- [61] «Nueva norma de emisiones Euro7: qué es, cuándo se aplica y a qué vehículos afecta», *La Vanguardia*, 10 de febrero de 2022. <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20220210/7819316/nueva-norma-emisiones-euro7-que-es-cuando-aplica-vehiculos-afecta.html> (accedido 29 de agosto de 2022).
- [62] «EVs will be cheaper than petrol cars in all segments by 2027», *Transport & Environment*, 10 de mayo de 2021. <https://www.transportenvironment.org/discover/evs-will-be-cheaper->

- than-petrol-cars-in-all-segments-by-2027-bnef-analysis-finds/ (accedido 12 de abril de 2022).
- [63] «FCEVs to be cheaper to run than BEVs and ICE vehicles within 10 years | Deloitte China | Press release», *Deloitte China*. <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/about-deloitte/articles/pr-fcevs-to-be-cheaper-to-run-than-bevs-and-ice-vehicles-within-10-years.html> (accedido 23 de marzo de 2022).
- [64] «ANFAC | Informe Anual 2021». <https://anfac.com/publicaciones/informe-anual-2021/> (accedido 25 de julio de 2022).
- [65] «EVs: Are they really more efficient?», *Australian Energy Council*. <https://www.energycouncil.com.au/analysis/evs-are-they-really-more-efficient/> (accedido 1 de agosto de 2022).
- [66] «EV battery costs set to spike as raw material shortages drags on». <https://www.cnbc.com/2022/05/18/ev-battery-costs-set-to-spike-as-raw-material-shortages-drags-on.html> (accedido 2 de agosto de 2022).
- [67] «How lithium mining is fueling the EV revolution | McKinsey». <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/lithium-mining-how-new-production-technologies-could-fuel-the-global-ev-revolution> (accedido 2 de agosto de 2022).
- [68] «COSTS AND FINANCING | H2 Station Maps». <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing> (accedido 3 de agosto de 2022).
- [69] «Programa de ayudas MOVES Proyectos Singulares». <https://sede.idae.gob.es/lang/modulo/?refbol=tramites-servicios&refsec=programa-moves&refsec=programa-moves&idarticulo=146887> (accedido 3 de agosto de 2022).
- [70] «Programa de ayudas MOVES Proyectos Singulares II». <https://sede.idae.gob.es/lang/modulo/?refbol=tramites-servicios&refsec=programa-moves&refsec=programa-moves&idarticulo=146931> (accedido 3 de agosto de 2022).
- [71] H. Bekker, «2022 (June) Europe: Car Sales and Market Analysis», *Car Sales Statistics*, 29 de julio de 2022. <https://www.best-selling-cars.com/europe/2022-june-europe-car-sales-and-market-analysis/> (accedido 3 de agosto de 2022).
- [72] A. Oliveira *et al.*, *Joint analysis of the Portuguese and Spanish NECP for 2021-2030*. 2020, p. 6. doi: 10.1109/EEM49802.2020.9221957.
- [73] P. G. Bejerano, «Portugal logra abastecerse solo con renovables durante un mes», *Blogthinkbig.com*, 12 de abril de 2018. <https://blogthinkbig.com/portugal-energia-renovable> (accedido 12 de agosto de 2022).

- [74] «Portugal becomes the fourth EU country to stop using coal», *euronews*, 22 de noviembre de 2021. <https://www.euronews.com/green/2021/11/22/portugal-becomes-the-fourth-eu-country-to-stop-using-coal-to-generate-electricity> (accedido 12 de agosto de 2022).
- [75] «Población, total - Spain, Portugal | Data». <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=ES-PT> (accedido 17 de agosto de 2022).

8. ANEXOS

Anexo I. Evolución del parque de vehículos

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario base en España.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	32,56	0,062742	0	99,81%	0,19%	0,00%
2023	31,2579	1,09078	0	96,63%	3,37%	0,00%
2024	29,7975	2,00288	0	93,70%	6,30%	0,00%
2025	28,1789	2,79914	0	90,96%	9,04%	0,00%
2026	26,4409	3,71471	0	87,68%	12,32%	0,00%
2027	24,4209	4,3641	0	84,84%	15,16%	0,00%
2028	21,7391	5,4011	0	80,10%	19,90%	0,00%
2029	19,0474	6,17371	0	75,52%	24,48%	0,00%
2030	16,3341	6,69381	0	70,93%	29,07%	0,00%
2031	13,6208	7,76226	0	63,70%	36,30%	0,00%
2032	10,9085	9,10391	0	54,51%	45,49%	0,00%
2033	8,19513	10,6187	0,102098	43,32%	56,14%	0,54%
2034	5,48869	12,3833	0,221444	30,34%	68,44%	1,22%
2035	4,07742	12,9222	0,545544	23,24%	73,65%	3,11%
2036	2,8245	13,5769	0,869596	16,35%	78,61%	5,04%
2037	1,72979	14,1237	1,14754	10,17%	83,08%	6,75%
2038	0,754487	14,5546	1,42619	4,51%	86,97%	8,52%
2039	0,0665421	14,7953	1,61187	0,40%	89,81%	9,78%
2040	0,0374788	14,4274	1,75139	0,23%	88,97%	10,80%
2041	0,01628	14,1018	1,84471	0,10%	88,34%	11,56%
2042	0,01628	13,8052	1,89185	0,10%	87,86%	12,04%
2043	0,01628	13,418	2,03338	0,11%	86,75%	13,15%
2044	0,01628	12,9186	2,29103	0,11%	84,85%	15,05%
2045	0,01628	12,4591	2,51262	0,11%	83,13%	16,76%

Tabla 14. Evolución del parque de vehículos en el escenario base en España.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario base en Portugal.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	5,40001	0,02819	0	99,48%	0,52%	0,00%
2023	5,18534	0,197257	0	96,34%	3,66%	0,00%
2024	4,94427	0,34709	0	93,44%	6,56%	0,00%
2025	4,67682	0,477707	0	90,73%	9,27%	0,00%
2026	4,38957	0,628109	0	87,48%	12,52%	0,00%
2027	4,05527	0,734356	0	84,67%	15,33%	0,00%
2028	3,61053	0,905416	0	79,95%	20,05%	0,00%
2029	3,16414	1,03248	0	75,40%	24,60%	0,00%
2030	2,71414	1,11755	0	70,83%	29,17%	0,00%
2031	2,26414	1,29385	0	63,64%	36,36%	0,00%
2032	1,81431	1,51561	0	54,49%	45,51%	0,00%
2033	1,36431	1,76623	0,0169332	43,35%	56,12%	0,54%
2034	0,915448	2,05845	0,0367269	30,41%	68,37%	1,22%
2035	0,680111	2,18277	0,0565226	23,30%	74,77%	1,94%
2036	0,471179	2,29229	0,110304	16,40%	79,77%	3,84%
2037	0,28863	2,38379	0,156433	10,20%	84,27%	5,53%
2038	0,125885	2,45607	0,202678	4,52%	88,20%	7,28%
2039	0,0110843	2,49653	0,233495	0,40%	91,08%	8,52%
2040	0,00623645	2,43538	0,256649	0,23%	90,26%	9,51%
2041	0,0027	2,38126	0,272137	0,10%	89,65%	10,25%
2042	0,0027	2,33192	0,279961	0,10%	89,19%	10,71%
2043	0,0027	2,26757	0,30345	0,10%	88,10%	11,79%
2044	0,0027	2,19613	0,334656	0,11%	86,68%	13,21%
2045	0,0027	2,13421	0,356983	0,11%	85,58%	14,31%

Tabla 15. Evolución del parque de vehículos en el escenario base en Portugal.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en España.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	32,56	0,062742	0	99,81%	0,19%	0,00%
2023	31,2579	1,09078	0	96,63%	3,37%	0,00%
2024	29,7975	2,00288	0	93,70%	6,30%	0,00%
2025	28,1789	2,79914	0	90,96%	9,04%	0,00%
2026	26,5602	3,59536	0	88,08%	11,92%	0,00%
2027	24,6251	4,1599	0	85,55%	14,45%	0,00%
2028	22,4641	4,67614	0	82,77%	17,23%	0,00%
2029	20,162	5,05915	0	79,94%	20,06%	0,00%
2030	17,5489	5,47902	0	76,21%	23,79%	0,00%
2031	14,8667	6,4498	0,0665535	69,53%	30,16%	0,31%
2032	12,1898	7,67116	0,151395	60,91%	38,33%	0,76%
2033	9,47869	9,01034	0,426868	50,11%	47,63%	2,26%
2034	6,77049	10,572	0,750933	37,42%	58,43%	4,15%
2035	5,35922	10,9318	1,2542	30,55%	62,31%	7,15%
2036	4,1063	10,6475	2,51713	23,78%	61,65%	14,57%
2037	3,01159	9,84605	4,14339	17,71%	57,91%	24,37%
2038	1,91694	9,0446	5,77376	11,45%	54,05%	34,50%
2039	1,13872	8,47483	6,86018	6,91%	51,44%	41,64%
2040	0,586394	7,95337	7,67648	3,62%	49,05%	47,34%
2041	0,175164	7,56512	8,2225	1,10%	47,39%	51,51%
2042	0,0818232	7,14003	8,49144	0,52%	45,44%	54,04%
2043	0,0527628	6,16402	9,25091	0,34%	39,85%	59,81%
2044	0,01628	4,93743	10,2722	0,11%	32,43%	67,47%
2045	0,01628	3,59302	11,3786	0,11%	23,97%	75,92%

Tabla 16. Evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en España.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en Portugal.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	5,40001	0,02819	0	99,48%	0,52%	0,00%
2023	5,18534	0,197257	0	96,34%	3,66%	0,00%
2024	4,94427	0,34709	0	93,44%	6,56%	0,00%
2025	4,67682	0,477707	0	90,73%	9,27%	0,00%
2026	4,40936	0,608316	0	87,88%	12,12%	0,00%
2027	4,08913	0,70049	0	85,37%	14,63%	0,00%
2028	3,7313	0,784647	0	82,62%	17,38%	0,00%
2029	3,34992	0,846705	0	79,82%	20,18%	0,00%
2030	2,91664	0,915048	0	76,12%	23,88%	0,00%
2031	2,47182	1,07513	0,011038	69,47%	30,22%	0,31%
2032	2,02791	1,2769	0,0251091	60,90%	38,35%	0,75%
2033	1,57827	1,49837	0,0708279	50,14%	47,61%	2,25%
2034	1,12912	1,75689	0,124611	37,50%	58,36%	4,14%
2035	0,893786	1,82742	0,198197	30,62%	62,60%	6,79%
2036	0,684854	1,78088	0,408035	23,83%	61,97%	14,20%
2037	0,502305	1,64791	0,678633	17,76%	58,25%	23,99%
2038	0,319766	1,51496	0,949915	11,48%	54,40%	34,11%
2039	0,189994	1,42043	1,13069	6,93%	51,82%	41,25%
2040	0,0978287	1,33393	1,26651	3,63%	49,44%	46,94%
2041	0,0292083	1,26952	1,35737	1,10%	47,80%	51,10%
2042	0,0136328	1,19883	1,40212	0,52%	45,85%	53,63%
2043	0,00878546	1,0364	1,52853	0,34%	40,27%	59,39%
2044	0,0027	0,832274	1,69851	0,11%	32,85%	67,04%
2045	0,0027	0,608454	1,88274	0,11%	24,40%	75,49%

Tabla 17. Evolución del parque de vehículos en el escenario EMP en Portugal.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en España.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	32,56	0,062742	0	99,81%	0,19%	0,00%
2023	31,2579	1,09078	0	96,63%	3,37%	0,00%
2024	29,7975	2,00288	0	93,70%	6,30%	0,00%
2025	28,1789	2,79914	0	90,96%	9,04%	0,00%
2026	26,4409	3,71471	0	87,68%	12,32%	0,00%
2027	24,4209	4,3641	0	84,84%	15,16%	0,00%
2028	21,7391	5,4011	0	80,10%	19,90%	0,00%
2029	19,0474	6,17371	0	75,52%	24,48%	0,00%
2030	16,3341	6,69381	0	70,93%	29,07%	0,00%
2031	13,6208	7,76226	0	63,70%	36,30%	0,00%
2032	10,9074	9,10494	0	54,50%	45,50%	0,00%
2033	8,1941	10,7218	0	43,32%	56,68%	0,00%
2034	5,48869	12,6047	0	30,34%	69,66%	0,00%
2035	4,07742	13,3484	0,119358	23,24%	76,08%	0,68%
2036	2,8245	14,2078	0,238699	16,35%	82,26%	1,38%
2037	1,72979	14,7546	0,516645	10,17%	86,79%	3,04%
2038	0,754487	15,1855	0,795294	4,51%	90,74%	4,75%
2039	0,0665421	15,4262	0,980976	0,40%	93,64%	5,95%
2040	0,0374788	15,0583	1,12049	0,23%	92,86%	6,91%
2041	0,01628	14,7327	1,21381	0,10%	92,29%	7,60%
2042	0,01628	14,4361	1,26096	0,10%	91,87%	8,02%
2043	0,01628	14,0489	1,40248	0,11%	90,83%	9,07%
2044	0,01628	13,6181	1,59154	0,11%	89,44%	10,45%
2045	0,01628	13,0564	1,91522	0,11%	87,11%	12,78%

Tabla 18. Evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en España.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en Portugal.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	5,40001	0,02819	0	99,48%	0,52%	0,00%
2023	5,18534	0,197257	0	96,34%	3,66%	0,00%
2024	4,94427	0,34709	0	93,44%	6,56%	0,00%
2025	4,67682	0,477707	0	90,73%	9,27%	0,00%
2026	4,38957	0,628109	0	87,48%	12,52%	0,00%
2027	4,05527	0,734356	0	84,67%	15,33%	0,00%
2028	3,61053	0,905416	0	79,95%	20,05%	0,00%
2029	3,16414	1,03248	0	75,40%	24,60%	0,00%
2030	2,71414	1,11755	0	70,83%	29,17%	0,00%
2031	2,26414	1,29385	0	63,64%	36,36%	0,00%
2032	1,81414	1,51578	0	54,48%	45,52%	0,00%
2033	1,36414	1,78334	0	43,34%	56,66%	0,00%
2034	0,915448	2,09517	0	30,41%	69,59%	0,00%
2035	0,680111	2,21949	0,0197958	23,30%	76,03%	0,68%
2036	0,471179	2,363	0,0395886	16,40%	82,23%	1,38%
2037	0,28863	2,48366	0,0565654	10,20%	87,80%	2,00%
2038	0,125885	2,55594	0,102811	4,52%	91,79%	3,69%
2039	0,0110843	2,5964	0,133628	0,40%	94,72%	4,87%
2040	0,00623645	2,53525	0,156782	0,23%	93,96%	5,81%
2041	0,0027	2,48113	0,17227	0,10%	93,41%	6,49%
2042	0,0027	2,43179	0,180094	0,10%	93,01%	6,89%
2043	0,0027	2,36743	0,203583	0,10%	91,99%	7,91%
2044	0,0027	2,29583	0,234959	0,11%	90,62%	9,27%
2045	0,0027	2,21697	0,274219	0,11%	88,90%	11,00%

Tabla 19. Evolución del parque de vehículos en el escenario DTH en Portugal.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario EMP+DTH en España.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	32,56	0,062742	0	99,81%	0,19%	0,00%
2023	31,2579	1,09078	0	96,63%	3,37%	0,00%
2024	29,7975	2,00288	0	93,70%	6,30%	0,00%
2025	28,1789	2,79914	0	90,96%	9,04%	0,00%
2026	26,5602	3,59536	0	88,08%	11,92%	0,00%
2027	24,6251	4,1599	0	85,55%	14,45%	0,00%
2028	22,4641	4,67614	0	82,77%	17,23%	0,00%
2029	20,162	5,05915	0	79,94%	20,06%	0,00%
2030	17,5489	5,47902	0	76,21%	23,79%	0,00%
2031	14,8656	6,51738	0	69,52%	30,48%	0,00%
2032	12,1888	7,82358	0	60,91%	39,09%	0,00%
2033	9,47693	9,3379	0,101072	50,10%	49,37%	0,53%
2034	6,77049	11,1025	0,220417	37,42%	61,36%	1,22%
2035	5,35922	11,6415	0,544517	30,55%	66,35%	3,10%
2036	4,1063	12,2961	0,868569	23,78%	71,20%	5,03%
2037	3,01159	12,5358	1,4536	17,71%	73,74%	8,55%
2038	1,91694	11,7344	3,08397	11,45%	70,12%	18,43%
2039	1,13872	11,1646	4,17039	6,91%	67,77%	25,32%
2040	0,586394	10,6432	4,98669	3,62%	65,63%	30,75%
2041	0,175164	10,2549	5,53271	1,10%	64,24%	34,66%
2042	0,0818232	9,82982	5,80165	0,52%	62,56%	36,92%
2043	0,0527628	8,78623	6,6287	0,34%	56,80%	42,86%
2044	0,01628	7,4748	7,73485	0,11%	49,09%	50,80%
2045	0,01628	5,95525	9,01641	0,11%	39,73%	60,16%

Tabla 20. Evolución del parque de vehículos en escenario EMP+DTH en España.

Resultados de la evolución del parque de vehículos en el escenario EMP+DTH en Portugal.

Año	Parque total de vehículos [millones de ud.]			Porcentaje de penetración [%]		
	ICEV	BEV	FCEV	ICEV	BEV	FCEV
2022	5,40001	0,02819	0	99,48%	0,52%	0,00%
2023	5,18534	0,197257	0	96,34%	3,66%	0,00%
2024	4,94427	0,34709	0	93,44%	6,56%	0,00%
2025	4,67682	0,477707	0	90,73%	9,27%	0,00%
2026	4,40936	0,608316	0	87,88%	12,12%	0,00%
2027	4,08913	0,70049	0	85,37%	14,63%	0,00%
2028	3,7313	0,784647	0	82,62%	17,38%	0,00%
2029	3,34992	0,846705	0	79,82%	20,18%	0,00%
2030	2,91664	0,915048	0	76,12%	23,88%	0,00%
2031	2,47165	1,08633	0	69,47%	30,53%	0,00%
2032	2,02774	1,30218	0	60,89%	39,11%	0,00%
2033	1,57798	1,55273	0,0167629	50,13%	49,33%	0,53%
2034	1,12912	1,84494	0,0365566	37,50%	61,28%	1,21%
2035	0,893786	1,93527	0,0903455	30,62%	66,29%	3,09%
2036	0,684854	2,04479	0,144126	23,83%	71,15%	5,02%
2037	0,502305	2,11931	0,207233	17,76%	74,92%	7,33%
2038	0,319766	1,98636	0,478515	11,48%	71,33%	17,18%
2039	0,189994	1,89183	0,659288	6,93%	69,02%	24,05%
2040	0,0978287	1,80533	0,795115	3,63%	66,91%	29,47%
2041	0,0292083	1,74092	0,885968	1,10%	65,54%	33,36%
2042	0,0136328	1,67023	0,930721	0,52%	63,88%	35,60%
2043	0,00878546	1,49659	1,06834	0,34%	58,15%	41,51%
2044	0,0027	1,27839	1,25239	0,11%	50,46%	49,43%
2045	0,0027	1,0255	1,46569	0,11%	41,12%	58,77%

Tabla 21. Evolución del parque de vehículos en escenario EMP+DTH en Portugal.

Anexo II. Evolución de las emisiones totales de CO₂

Resultados de la evolución de las emisiones totales de CO₂ en España.

Año	Emisiones totales de CO₂ [millones de ton. CO₂]			
	E. Base	E. EMP	E. DTH	E. EMP+DTH
2022	145,15	145,15	145,15	145,15
2023	138,384	138,384	138,384	138,384
2024	130,798	130,798	130,798	130,798
2025	119,051	119,051	119,051	119,051
2026	110,31	110,777	110,31	110,777
2027	100,248	101,061	100,248	101,061
2028	89,4129	90,6681	89,4129	90,6681
2029	81,1512	82,7648	81,1512	82,7648
2030	69,6667	71,0476	69,6667	71,0476
2031	63,7239	65,2625	63,7239	65,5003
2032	54,8348	56,2257	54,8309	56,6719
2033	46,4758	47,0142	46,8381	48,1932
2034	42,1099	41,7296	42,914	43,7106
2035	39,986	38,8299	41,5258	41,4729
2036	35,2665	32,4772	37,6667	36,8494
2037	28,201	23,0134	30,6023	29,1056
2038	21,2838	15,4125	23,633	19,1158
2039	14,8609	10,9835	17,3744	13,1866
2040	10,282	7,06885	11,5223	9,26747
2041	9,93958	7,01956	11,0846	8,3001
2042	9,97749	7,50538	10,8917	8,75715
2043	10,498	7,91812	11,1788	9,07368
2044	10,7384	8,11511	11,523	9,13842
2045	11,1471	8,60295	11,8957	9,38189

Tabla 22. Evolución de las emisiones totales de CO₂ en España.

Resultados de la evolución de las emisiones totales de CO₂ en Portugal.

Año	Emisiones totales de CO ₂ [millones de ton. CO ₂]			
	E. Base	E. EMP	E. DTH	E. EMP+DTH
2022	22,9382	22,9382	22,9382	22,9382
2023	21,4807	21,4807	21,4807	21,4807
2024	20,1576	20,1576	20,1576	20,1576
2025	18,7256	18,7256	18,7256	18,7256
2026	17,2117	17,3718	17,2117	17,3718
2027	15,6256	15,8295	15,6256	15,8295
2028	13,8664	14,2421	13,8664	14,2421
2029	12,0507	12,5183	12,0507	12,5183
2030	10,2157	10,958	10,2157	10,958
2031	8,47731	8,9965	8,47731	8,99525
2032	6,76983	7,23554	6,76857	7,25039
2033	4,98053	5,45451	4,98377	5,45939
2034	3,35262	3,7374	3,35262	3,90057
2035	2,84033	3,25836	2,84369	3,37931
2036	2,36123	2,6106	2,37225	2,84747
2037	1,59762	2,08027	1,60888	2,13054
2038	1,40742	1,94031	1,43575	1,95427
2039	1,17305	1,43848	1,15514	1,63007
2040	1,31576	1,11505	1,32588	1,2648
2041	1,2072	0,959653	1,31563	0,981395
2042	0,923938	0,934662	0,997463	0,934662
2043	0,923938	0,929907	0,923938	0,929907
2044	0,926469	0,926469	0,926469	0,926469
2045	0,923938	0,923938	0,923938	0,923938

Tabla 23. Evolución de las emisiones totales de CO₂ en Portugal.

Anexo III. Evolución de los precios de la electricidad

Resultados de la evolución de los precios de la electricidad en España.

Año	Precio de la electricidad [€/MWh]			
	E. Base	E. EMP	E. DTH	E. EMP+DTH
2022	22,271	22,271	22,271	22,271
2023	24,373	24,373	24,373	24,373
2024	25,000	25,000	25,000	25,000
2025	28,557	28,557	28,557	28,557
2026	29,312	29,049	29,312	29,049
2027	29,669	29,176	29,669	29,176
2028	30,248	28,823	30,248	28,823
2029	30,699	29,804	30,699	29,804
2030	35,805	33,524	35,805	33,524
2031	37,346	36,527	37,346	36,527
2032	39,020	37,777	39,020	38,076
2033	39,900	38,886	39,947	38,914
2034	41,038	40,687	41,064	40,982
2035	49,413	49,156	49,461	49,345
2036	50,330	48,844	50,433	49,124
2037	50,017	47,260	50,458	49,783
2038	50,603	38,023	50,673	46,830
2039	48,662	37,289	49,817	38,426
2040	38,477	35,920	39,083	37,758
2041	39,181	32,346	39,846	35,249
2042	33,796	32,361	39,170	33,688
2043	34,518	33,471	34,581	34,448
2044	35,517	34,500	35,548	35,401
2045	35,853	35,581	36,608	35,654

Tabla 24. Evolución de los precios de la electricidad en España.

Resultados de la evolución de los precios de la electricidad en Portugal.

Año	Precio de la electricidad [€/MWh]			
	E. Base	E. EMP	E. DTH	E. EMP+DTH
2022	24,119	24,119	24,119	24,119
2023	24,734	24,734	24,734	24,734
2024	25,081	25,081	25,081	25,081
2025	28,557	28,557	28,557	28,557
2026	29,312	29,049	29,312	29,049
2027	29,669	29,176	29,669	29,176
2028	30,248	28,823	30,248	28,823
2029	30,699	29,804	30,699	29,804
2030	35,805	33,524	35,805	33,524
2031	37,346	36,527	37,346	36,527
2032	39,020	37,777	39,020	38,076
2033	39,903	38,898	39,949	38,927
2034	41,044	40,690	41,070	40,988
2035	49,419	49,159	49,467	49,350
2036	50,335	47,972	50,440	49,141
2037	48,329	42,519	48,931	48,157
2038	50,603	38,023	50,673	46,830
2039	47,647	37,266	48,924	38,403
2040	38,122	27,420	38,722	37,411
2041	38,644	0,000	39,462	15,909
2042	0,000474589	0,000	32,409	0,000
2043	0,000	0,000	0.000498273	0,000
2044	0,000	0,000	0,000	0,000
2045	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 25. Evolución de los precios de la electricidad en Portugal.