



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

El futuro de los coches de hidrógeno

Autor: Santiago García Prieto

Director: Juan Norberto Moriñigo

Madrid, Julio 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

El futuro de los coches de hidrógeno

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

curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y

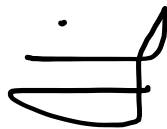
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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.: Santiago García Prieto

Fecha: 29/6/2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo

Fecha: 5/7/2021

**NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
DNI 09746499L**

Firmado digitalmente por
NORVERTO MORIÑIGO JUAN -
DNI 09746499L
Fecha: 2021.07.05 19:28:37
+02'00'



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

El futuro de los coches de hidrógeno

Autor: Santiago García Prieto

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid, Julio 2021

EL FUTURO DE LOS COCHES DE HIDRÓGENO

Autor: García Prieto, Santiago.

Director: Norveto Moriño, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En primer lugar, en el trabajo se presenta un amplio marco teórico referente tanto al hidrógeno y sus características, como a los diferentes tipos de vehículos. Se lleva a cabo una comparativa detallada entre cada tipo de vehículo, en el presente y en el futuro, con el fin de poder realizar una estimación temporal de las principales características que afectarán al futuro del hidrógeno en la movilidad, y en concreto, en el transporte privado terrestre. Estas son: la infraestructura de recarga, el precio del combustible, y el precio de compra del vehículo. Se estiman tanto las características de los vehículos de hidrógeno como la de los vehículos 100 % eléctricos, con el fin de atender también al principal competidor de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Los resultados de las estimaciones indican que, dependiendo del desarrollo de la infraestructura de recarga, los vehículos de hidrógeno podrán tener cabida en el mercado a partir de 2030, siendo completamente competitivos frente a los puramente eléctricos en las demás características mencionadas. En el caso de España, en concreto, el escaso desarrollo de infraestructura de recarga de cara al 2030, no facilitará la correcta incursión de estos vehículos en el parque automovilístico, al meno en cuanto a vehículos ligeros.

Palabras clave: Hidrógeno, sostenibilidad, transición, futuro, transporte, vehículos eléctricos, celda de combustible, infraestructura de carga.

1. Introducción

La industria automovilística se encuentra en un momento decisivo para su futuro. Con las crecientes restricciones a los vehículos de combustión, y la pujanza europea para descarbonizar el sector transportes, la idea de avanzar hacia tecnologías neutras en carbono es evidente [1].

Cuando parecía que los vehículos electrificados estaban empezando a implantarse como el principal medio para liderar la descarbonización de la movilidad, en los últimos años ha aparecido una alternativa neutral en carbono que podría resultar más beneficiosa que estos, los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Este tipo de vehículos resuelven algunas de las carencias que presentan los vehículos eléctricos en la actualidad, como son el tiempo de recarga y la autonomía [2]. Sin embargo, los elevados costes y la escasa infraestructura de carga, hacen que el hidrógeno todavía no sea una alternativa real a los vehículos eléctricos.

Además, varios estudios apuntan a la dificultad de electrificar la actual flota mundial de vehículos. No sólo en referencia a fabricación de las baterías, en donde la industria se enfrenta al problema de las reservas escasas de litio, sino en cuanto al reciclaje de estas [3].

2. Definición del proyecto

El trabajo pretende, por lo tanto, predecir los datos necesarios para poder dar respuesta a la incógnita sobre el futuro de la movilidad. Mientras que algunos apuntan a que el vehículo eléctrico será el principal actor en la descarbonización de este sector, países como Corea, Japón o EEUU ya están realizando grandes inversiones en el desarrollo de los vehículos de pila de combustible [4]. Para poder obtener resultados coherentes, útiles, y fundamentados, el trabajo pretende cumplir los siguientes objetivos:

- A. Entender las características del hidrógeno, tanto sus propiedades y posibles aplicaciones, como su funcionamiento como vector energético y sus ventajas frente a otras alternativas.
- B. Comparar los diferentes tipos de vehículos existentes en el mercado en la actualidad. Describir las características actuales de cada uno, y estimar algunas de ellas en el futuro.
- C. Analizar y entender las principales diferencias entre los vehículos eléctricos y los de hidrógeno.
- D. Predecir la evolución de las principales características de los vehículos eléctricos de batería y los de pila de combustible. Se pretende estimar aquellos rasgos que más peso tendrán en la comparativa entre ambas tecnologías en el futuro.

- E. Estimar el momento en el que los precios de producción de hidrógeno verde se equiparán a los de reformado, y en el que los precios de los vehículos 100 % eléctricos y de pila de combustible se equiparán a los de los vehículos de combustión.
- F. Poder concluir si el hidrógeno tendrá o no cabida en el sector transporte, en base a las estimaciones realizadas.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Las predicciones se han desarrollado para tanto los vehículos de hidrógeno como los puramente eléctricos. Algunas de ellas no se han podido predecir por insuficiencia de datos, por lo que se ha descrito las intenciones que se tienen en el país acerca de ellas (en concreto, la infraestructura de recarga) [1]. A continuación se enumeran dichas predicciones.

- A. El futuro precio de compra
- B. El futuro precio de combustible
- C. El futuro de la infraestructura de recarga

Actualmente, estos son los factores que juegan a favor del vehículo eléctrico frente al de hidrógeno. Especialmente en España, donde sólo hay 7 hidrogeneras [5], de las cuales sólo una está abierta al público, la desventaja del vehículo de hidrógeno es evidente. El resto de las características, sin embargo, sí parece que se podrán equiparar a las de los vehículos puramente eléctricos al comienzo de la próxima década.

4. Resultados

En la Figura 1 se ilustra el coste unitario de producción de hidrógeno de tres posibles plantas convencionales en el 2030, para una misma cantidad de producción diaria. Se observa como la electrólisis (línea azul), igualaría en costes a la planta de reformado con captura de CO₂ (línea verde) para un precio de la electricidad de 25 \$/kg, y a los costes de la planta sin captura (línea roja), para un precio de 11 \$/kg [6].

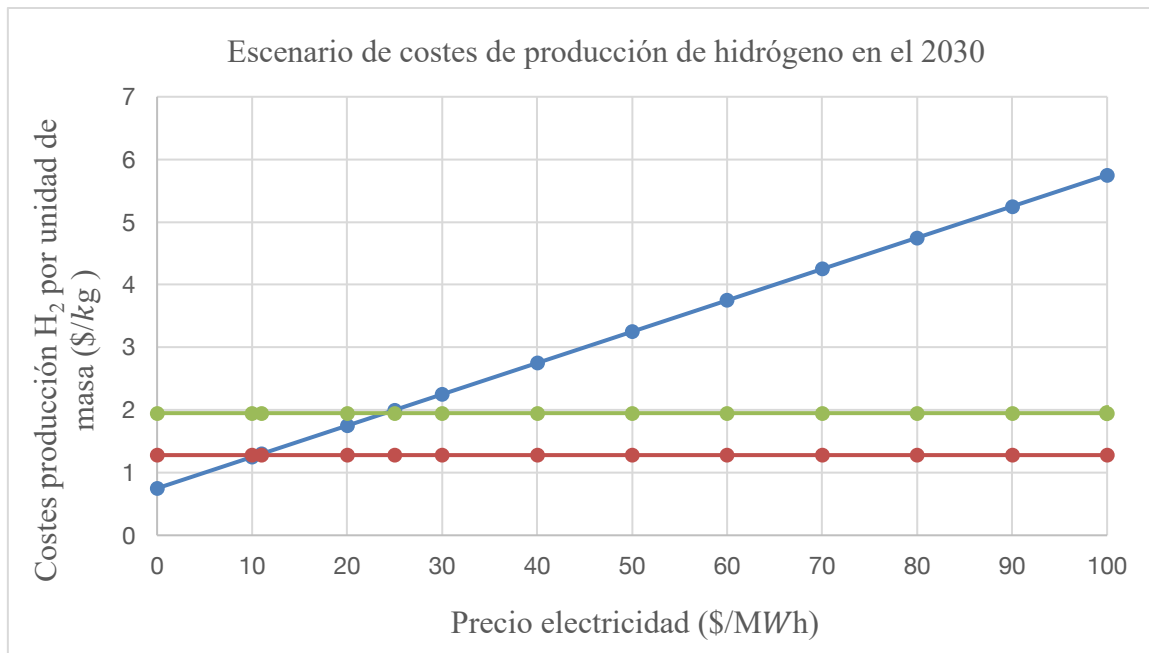


Figura 1. Escenario de costes de producción de hidrógeno en el 2030 [7][8]

Así mismo, también se han demostrado los siguientes sucesos referentes a tanto los vehículos eléctricos como los de hidrógeno:

- Habrá paridad de precios entre los vehículos eléctricos y los de combustión entre 2 y 3 años.
- El precio de los vehículos de hidrógeno sólo será un 10% mayor que el de los vehículos eléctricos en el 2030, y serán iguales en el 2035.
- El número de puntos de recarga de vehículos eléctricos se multiplicará por 38 de cara al 2030 [9].
- La infraestructura de recarga de vehículos de hidrógeno, sin embargo, no tendrá el mismo desarrollo, y se pretende que haya en el país 150 hidrogeneras de cara al 2030 [9].

5. Conclusiones

El hidrógeno, en general, tiene un elevado potencial en el sector transportes. En él, las mejores características técnicas de los FCEVs frente a los BEVs (menor tiempo de recarga y mayor autonomía), hubiese permitido el desarrollo a gran escala de los vehículos de hidrógeno en el país, en caso de haberse cumplido algunas premisas.

Algunas de ellas son: el abaratamiento de los costes de los métodos de producción de hidrógeno verde, de los precios de compra de los vehículos y de repostaje y, sobre todo, el desarrollo infraestructura de recarga en el país. Sin embargo, a diferencia de otras naciones, hasta ahora estas premisas no se han cumplido en España.

Sin embargo, la inversión, se ha focalizado en los vehículos eléctricos, lo cuál ha facilitado su mejor desarrollo, permitiendo una mejor infraestructura de recarga, así como unos precios más bajos. De todas formas, algunas de estas premisas sí se cumplirán en los próximos años. Por ejemplo, la bajada del precio de la electrólisis será un factor clave para la correcta incursión de estos vehículos en el parque automovilístico, y para el desarrollo general del hidrógeno como vector energético. En cuanto al precio del vehículo, también se ha demostrado que el año al partir del cual prácticamente habrá paridad de precio con los eléctricos es el 2030, premisa que se cumplirá a nivel global.

De todos modos, la principal diferencia entre España y otros países es el desarrollo de la infraestructura de recarga, para la cual no se esperan grandes avances, al contrario que para los otros dos factores mencionados. Mientras que naciones como Alemania y EEUU tienen un detallado plan para desarrollar la infraestructura necesaria (y de hecho ya cuentan con un buen número de hidrogeneras), España presenta un plan muy poco ambicioso. Si los 8500 puntos de recarga de vehículos eléctricos existentes en el país son insuficientes, las 150 hidrogeneras que se pretenden implantar lo son todavía más. De hecho, la distancia entre estas puede llegar a ser de 250 km [9], lo que revela un importante problema de indisponibilidad a medio plazo de puntos de recarga.

En el largo plazo (es decir, más allá del 2030) los vehículos electrificados adquirirán una importante cuota de mercado [10], mientras que los de hidrógeno podrán empezar a aumentar su número de ventas. Con los precios de las electrólisis equiparables a los del reformado, y los precios de compra de los vehículos equiparables a los eléctricos entre el 2030 y 2035, el futuro de los vehículos de hidrógeno en el país dependerá del desarrollo de infraestructura de recarga que se realice. Sin una correcta infraestructura de recarga, es muy difícil que una nueva alternativa de vehículo se expanda eficientemente, como se está viendo con los BEVs.

THE FUTURE OF HYDROGEN CARS

Author: García Prieto, Santiago.

Director: Norveto Moriño, Juan.

Collaborating Entity: ICAI - Comillas Pontifical University

ABSTRACT

First of all, the work presents a broad theoretical framework regarding both hydrogen and its characteristics, as well as the different types of vehicles. A detailed comparison is carried out between each type of vehicle, in the present and in the future, in order to be able to make a temporary estimate of the main characteristics that will affect the future of hydrogen in mobility, and specifically, in the private land transportation. These are: the charging infrastructure, the price of fuel, and the purchase price of the vehicle. Both the characteristics of hydrogen vehicles and that of 100% electric vehicles are estimated, in order to also serve the main competitor of hydrogen fuel cell vehicles. The results of the estimates indicate that, Depending on the development of the recharging infrastructure, hydrogen vehicles may have a place in the market from 2030, being completely competitive compared to purely electric vehicles in the other characteristics mentioned. In the case of Spain, in particular, the scarce development of recharging infrastructure for 2030 will not facilitate the correct incursion of these vehicles in the automobile fleet, at least in terms of light vehicles.

Keywords: Hydrogen, sustainability, transition, future, transportation, electric vehicles, fuel cell, charging infrastructure.

1. Introduction

The automotive industry is at a turning point for its future. With the growing restrictions on combustion vehicles, and the European push to decarbonize the transport sector, the idea of moving towards carbon-neutral technologies is evident [1].

When it seemed that electrified vehicles were starting to emerge as the main means to lead the decarbonisation of mobility, in recent years a carbon-neutral alternative has emerged that could prove more beneficial than these, hydrogen fuel cell vehicles. These

types of vehicles solve some of the deficiencies that electric vehicles present today, such as recharging time and autonomy.[two]. However, high costs and poor charging infrastructure mean that hydrogen is not yet a real alternative to electric vehicles.

In addition, several studies point to the difficulty of electrifying the current world fleet of vehicles. Not only in reference to the manufacture of batteries, where the industry faces the problem of scarce lithium reserves, but also in terms of recycling these[3].

2. Definition of the project

The work aims, therefore, to predict the data necessary to be able to answer the question about the future of mobility. While some suggest that the electric vehicle will be the main actor in the decarbonisation of this sector, countries such as Korea, Japan or the United States are already investing heavily in the development of fuel cell vehicles.[4]. In order to obtain consistent, useful, and well-founded results, the work aims to meet the following objectives:

- A. Understand the characteristics of hydrogen, both its properties and possible applications, as well as its operation as an energy vector and its advantages over other alternatives.
- B. Compare the different types of vehicles on the market today. Describe the current characteristics of each one, and estimate some of them in the future.
- C. Analyze and understand the main differences between electric and hydrogen vehicles.
- D. Predict the evolution of the main characteristics of battery electric vehicles and fuel cell vehicles. It is intended to estimate those features that will have more weight in the comparison between both technologies in the future.
- E. Estimate when the prices of green hydrogen production will be equal to those of refurbishment, and when the prices of 100% electric and fuel cell vehicles will be equal to those of combustion vehicles.
- F. To be able to conclude whether or not hydrogen will have a place in the transport sector, based on the estimates made.

3. Description of the model / system / tool

The predictions have been developed for both hydrogen and purely electric vehicles. Some of them have not been predicted due to insufficient data, so it has been described the intentions that the country has about them (specifically, the charging infrastructure)[1]. These predictions are listed below.

- A. The future purchase price
- B. The future fuel price
- C. The future of charging infrastructure

Currently, these are the factors that play in favor of the electric vehicle over the hydrogen vehicle. Especially in Spain, where there are only 7 hydrogenators[5], of which only one is open to the public, the downside of the hydrogen vehicle is obvious. The rest of the features, however, do seem to be able to match those of purely electric vehicles at the beginning of the next decade.

4. Results

The Figure 2 shows the unitary cost of hydrogen production of three possible conventional plants in 2030 is illustrated, for the same amount of daily production. It is observed how electrolysis (blue line) would equalize in costs to the reforming plant with CO₂ capture (green line) for an electricity price of \$ 25 / kg, and to the costs of the plant without capture (red line) , for a price of \$ 11 / kg[6].

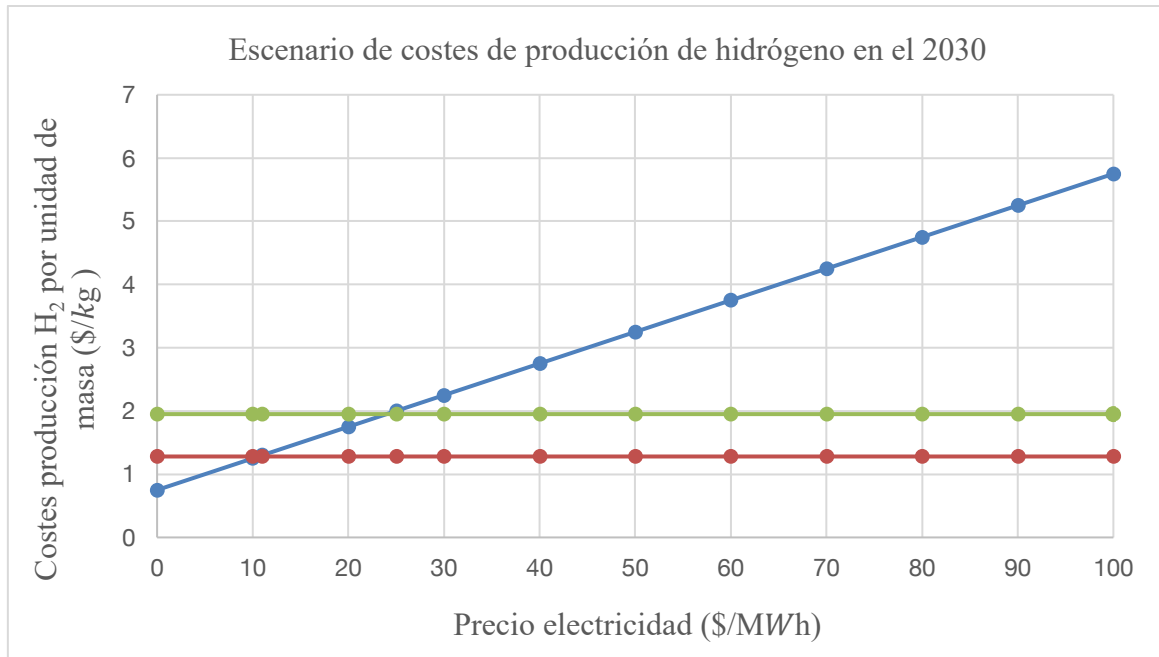


Figure 2. Hydrogen production cost scenario in 2030[7][8]

Likewise, the following events regarding both electric and hydrogen vehicles have also been demonstrated:

- There will be price parity between electric vehicles and combustion vehicles between 2 and 3 years.
- The price of hydrogen vehicles will only be 10% higher than that of electric vehicles in 2030, and they will be the same in 2035.
- The number of electric vehicle charging points will multiply by 38 by 2030 [9].
- The infrastructure for recharging hydrogen vehicles, however, will not have the same development, and it is expected that there will be 150 hydroelectric plants in the country by 2030 [9].

5. Conclusions

Hydrogen, in general, has a high potential in the transport sector. In it, the better technical characteristics of FCEVs compared to BEVs (shorter recharging time and greater autonomy), would have allowed the large-scale development of hydrogen vehicles in the country, if certain premises had been met. Some of them are: the lowering of the costs of green hydrogen production methods, the purchase prices of vehicles and refueling

and, above all, the development of recharging infrastructure in the country. However, unlike other nations, so far these premises have not been met in Spain.

However, the investment has been focused on electric vehicles, which has facilitated their better development, allowing a better charging infrastructure, as well as lower prices. In any case, some of these premises will be fulfilled in the coming years. For example, the drop in the price of electrolysis will be a key factor for the correct foray of these vehicles in the car fleet, and for the general development of hydrogen as an energy vector. Regarding the price of the vehicle, it has also been shown that the year from which there will practically be price parity with electric vehicles is 2030, a premise that will be fulfilled globally.

In any case, the main difference between Spain and other countries is the development of the charging infrastructure, for which great progress is not expected, unlike for the other two factors mentioned. While nations such as Germany and the US have a detailed plan to develop the necessary infrastructure (and in fact they already have a good number of hydrogen generators), Spain presents a very unambitious plan. If the 8,500 electric vehicle charging points in the country are insufficient, the 150 hydrogen generators that are being implemented are even more so. In fact, the distance between these can be up to 250 km[9], which reveals a significant problem of unavailability in the medium term of charging points.

In the long term (i.e. beyond 2030) electrified vehicles will acquire a significant market share [10], while those of hydrogen will be able to begin to increase their number of sales. With the prices of electrolysis comparable to those of the refurbished one, and the purchase prices of vehicles comparable to electric vehicles between 2030 and 2035, the future of hydrogen vehicles in the country will depend on the development of charging infrastructure that is carried out. . Without a correct charging infrastructure, it is very difficult for a new vehicle alternative to expand efficiently, as is being seen with BEVs.

Índice de la memoria

<i>Índice de tablas</i>	20
<i>Índice de figuras</i>	22
1 INTRODUCCIÓN	26
1.1 Estado del arte	26
1.2 Motivación del proyecto	28
1.3 Objetivos del proyecto	30
1.4 Metodología	31
2 EL HIDRÓGENO	33
2.1 Propiedades y seguridad	33
2.2 Almacenamiento	36
2.2.1 Hidrógeno gaseoso comprimido	36
2.2.2 Hidrógeno líquido	41
2.2.3 Otros método de almacenamiento	42
2.2.4 Comparativa entre métodos y nuevas tecnologías	43
2.3 Hidrógeno frente a otros combustibles	44
2.4 Producción	46
2.4.1 Procesos a partir del gas natural	47
2.4.2 Procesos a partir del agua	51
2.4.3 Otros procesos	54
2.5 Clasificación ambiental	55
3 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO	59
3.1 Aplicaciones convencionales: materia prima	59
3.2 Nuevas aplicaciones	61
3.2.1 Generación de calor	61
3.2.2 Sector trnsporte	63
4 TIPOS DE VEHÍCULOS	71
4.1 Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV)	71

4.2	Vehículos de combustión interna (ICE)	74
4.2.1	Gasolina como combustible.....	74
4.2.2	Diésel como como combustible.....	76
4.2.3	Gas como combustitble.....	77
4.3	Vehículos eléctricos (EV).....	78
4.3.1	Vehículos eléctricos de batería (BEV)	79
4.3.2	Vehículos híbridos no enchufables (HEV).....	80
4.3.3	Vehículos híbridos enchufables (PHEV).....	80
5	COMPARATIVA ENTRE TIPOS DE VEHÍCULOS.....	82
5.1	Autonomía	82
5.2	Consumo	89
5.3	Eficiencia	94
5.4	Precio del combustible.....	96
5.5	Tiempo y coste de recarga	97
5.6	Infraestructura de recarga	101
5.7	Efecto ambiental	106
5.8	Precio	112
6	EL FUTURO DE LOS VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO	118
6.1	Futuro precio de la producción de hidrógeno verde	118
6.2	Futuro precio del vehículo de hidrógeno	125
6.3	Futuro precio de los vehículos eléctricos	131
6.4	Futuro de la infraestructura de carga de los vehículos de hidrógeno	137
6.5	Futuro de la infraestructura de recarga de los vehículos eléctricos	139
7	RESULTADOS	144
8	CONCLUSIONES	146
9	BIBLIOGRAFÍA	148

Índice de tablas

Tabla 1. Densidades energéticas gravimétricas y volumétricas del hidrógeno para diferentes estados de presión y temperatura, donde T_o = Temperatura ambiente, y P_o = Presión ambiente. [4]	33
Tabla 2. Propiedades del hidrógeno y otros combustibles a temperatura y presión ambiente [7]	35
Tabla 3. Valor del factor de compresibilidad del hidrógeno a distintas presiones y temperaturas [8]	38
Tabla 4. Tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido [3] [8]	40
Tabla 5. Consumo energético en los procesos de compresión y licuefacción del hidrógeno [3].	43
Tabla 6. Comparativa de diferentes tipos de combustibles [13], [14], [15]	46
Tabla 7. Cantidad molar y másica de CO_2 emitido por un mol de H_2 [17]	49
Tabla 8. Valores teóricos de energía primaria necesaria y eficiencia de la electrólisis de agua en función de la presión y temperatura de la operación.....	52
Tabla 9. Autonomía de los 3 modelos principales de vehículos de hidrógeno en la actualidad [33]	82
Tabla 10. Evolución estimada de las autonomías medias y máximas reales de los BEVs en los próximos años	86
Tabla 11. Autonomías medias según el tipo de vehículo	89
Tabla 12. Consumo de combustible por cada 100 km de los diferentes tipos de un coche compacto tipo medio, en litros, kilogramos, y kWh [37]	93
Tabla 13. Consumo de combustible y coste asociado por cada 100 km de las diferentes tipologías de vehículos, en un coche compacto tipo medio.	97
Tabla 14. Distribución de los diferentes puntos de carga existentes en el país, clasificados por potencia	105
Tabla 15. Emisiones de dióxido de carbono de los diferentes tipos de vehículos de combustión interna [44]	111

Tabla 16. Límites de emisiones de NOx, CO y HC impuestos por las normas europeas en diferentes años [45].....	112
Tabla 17. Comparativa de precios para un mismo modelo Volkswagen de 2018.....	113
Tabla 18. Consumo WLTP combinado por cada 100 km de los diferentes tipos de vehículo, indicado por el fabricante.	115
Tabla 19. Precio anual del combustible, seguro y mantenimiento	116
Tabla 20. Precio total del combustible, seguro y mantenimiento al cabo de cinco años	117
Tabla 21. Costes totales de los diferentes tipos de vehículos tras cinco años	117
Tabla 22. Número de EV y PHEV en diferentes años.....	141
Tabla 23. Estimación de puntos de carga necesarios en España en la próxima década, según diferentes fuentes [64],.....	141
Tabla 24. Cálculo del número de vehículos eléctricos por puntos de carga necesarios en España en la próxima década, según diferentes fuentes.....	142

Índice de figuras

Figura 1. Escenario de costes de producción de hidrógeno en el 2030 [7][8].....	10
Figure 2. Hydrogen production cost scenario in 2030[7][8]	16
Figura 3. Evolución del número de turismos del parque automovilístico español para las diferentes tipologías de vehículos [10]......	27
Figura 4. Densidad del hidrógeno en función de la presión para el caso de gas ideal y de gas real, considerando el factor de compresibilidad “Z”. Se considera temperatura ambiente [16].....	37
Figura 5. Densidad del hidrógeno en función de la presión y la temperatura [18] [19].	44
Figura 6. Densidades energéticas gravimétrica y volumétrica de diferentes combustibles	45
Figura 7. Procesos para la producción de hidrógeno clasificados según la fuente de energía [24].....	47
Figura 8. Proceso de generación de hidrógeno por reformado de gas natural [11].....	49
Figura 9. Estructura de costes de producción de hidrógeno por electrólisis para estación de llenado doméstico (2 vehículos/día) y de gran escala (100 vehículos/día).....	53
Figura 10. Rutas de producción de hidrógeno potencialmente bajo en emisiones en función de la procedencia del recurso [11].....	57
Figura 11. Costes de producción de hidrógeno según la alternativa empleada y la procedencia de la energía [28].....	58
Figura 12. Usos del hidrógeno en la actualidad [29].....	59
Figura 13. Funcionamiento de un sistema de cogeneración doméstico, en el que se emplea gas natural como materia prima	62
Figura 14. Porcentaje de emisiones globales de efecto invernadero por sectores [30] ..	63
Figura 15. Distancia media diaria recorrida por los vehículos particulares en Europa [10].....	68
Figura 16. Despliegue de autobuses de hidrógeno en Europa, bajo el marco del proyecto JIVE [11]	70
Figura 17. Funcionamiento de la electrólisis inversa en una celda electrolítica [32].....	72

Figura 18. Diferentes elementos que participan en la propulsión de un vehículo de combustible de hidrógeno [31]	73
Figura 19. Partes de un motor de combustión interna de gasolina [35]	76
Figura 20. Principales partes de las diferentes tipologías de vehículos eléctricos, sin tener en cuenta los de pila de combustible [39].....	81
Figura 21. Autonomía media y máxima de los nuevos modelos de coches eléctricos a la venta en EE. UU desde 2011 [41]	83
Figura 22. Evolución histórica y estimada de la autonomía media real de los BEVs con los próximos años	87
Figura 23. Comparación de la eficiencia total de los vehículos eléctricos, de pila de combustible, y de combustión, desde el excedente de energía eléctrica hasta la propulsión del vehículo [42].....	90
Figura 24. Comparación de la eficiencia total de los BEV, ICE, PHEV, HEV, FCEV [45].....	95
Figura 25. Evolución de las tarifas de la luz durante un día [46]	99
Figura 26. Ranking de precios de recarga súper rápida en España en enero de 2020..	101
Figura 27. Número de puntos de carga y cargadores en el país. Distribución de los diferentes tipos de cargadores.....	103
Figura 28. Indicador de infraestructura de recarga ANFAC global en España, comparado con el de otros países europeos. Se indica el valor del primer trimestre del año 2021, y del último trimestre del año 2020.	104
Figura 29. Emisiones de los vehículos eléctricos y de combustión durante su ciclo de vida, teniendo en cuenta la fabricación y conducción de estos, para diferentes países de la Unión Europea	108
Figura 30. Emisiones por kilómetro recorrido de las diferentes tipologías de vehículos considerado un coche tipo medio, con un tiempo de vida y tasa de utilización medias [50].....	110
Figura 31. Coste unitario de producción de un kilogramo de hidrógeno, mediante el método de RGN con o sin captura del CO ₂ , para las diferentes regiones del mundo [52]	119

Figura 32. Bajada del precio de los electrolizadores en 10 años	120
Figura 33. Escenario de costes de producción de hidrógeno en el 2030	122
Figura 34. Curvas agregadas de oferta y demanda en el mercado ibérico de la electricidad (MIBEL), en el día 09/01/2021, a las 21:00 horas [56].	123
Figura 35. Distribución de la generación de electricidad en España. Se muestran datos reales (2015-2021), y datos estimados (2021-2030) [57].	124
Figura 36. Costes del sistema completo de celda de combustible en función de la producción anual en miles de unidades [55].	126
Figura 37. Evolución histórica y estimación de la producción de vehículos a nivel global [62].	127
Figura 38. Evolución histórica y estimación temporal de la producción de FCEV a nivel global [55].	128
Figura 39. Evolución histórica y estimación temporal de la producción de FCEV a nivel global [55].	128
Figura 40. Evolución del coste de los tanques de hidrógeno vehiculares	129
Figura 41. Coste total de propiedad de los vehículos de hidrógeno frente al de los vehículos 100 % eléctricos	130
Figura 42. Costes de fabricación en una escala normalizada [63].	131
Figura 43. Evolución del precio de las baterías eléctricas a nivel mundial, desde el año 2013 al 2021, con el precio indicado en dólares [65].	132
Figura 44. Reducción anual en valor absoluto del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas. Precio dado en dólares.	133
Figura 45. Reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas.	134
Figura 46. Estimación de la reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas, en los próximos 10 años.	135
Figura 47. Estimación de la reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas, en los próximos 10 años.	135
Figura 48. Evolución y estimación del precio de las baterías eléctricas a nivel mundial, desde el año 2013 al 2030, con el precio indicado en dólares.	136

Figura 49. Mapa de hidrogeneras en el país para el 2025 [68].....	138
Figura 50. Número de vehículos puramente eléctricos e híbridos enchufables en abril de 2021 [10].....	140
Figura 51. Evolución del número de turismos del parque automovilístico español para las diferentes tipologías de vehículos [10]	140
Figura 52. Puntos de recarga de vehículos eléctricos en una zona de España [71].....	143

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

Actualmente, el hidrógeno es una alternativa energética muy candente y prometedora. A través de él, se podrían descarbonizar diversos sectores de la economía, promoviendo la reducción de emisiones totales. Por lo tanto, son varios los organismos que investigan y velan por su desarrollo, tanto a nivel nacional como internacional.

Algunas instituciones se dedican principalmente al desarrollo del hidrógeno, y en otras de ellas, aunque este no sea su principal foco de atención, también cobra un papel importante. El organismo Hydrogen Council, por ejemplo, se dedica principalmente a la investigación sobre el hidrógeno. A través de diversos estudios realizados por este organismo, se promueve el potencial de este vector energético, y se establecen algunas de las pautas para su correcto desarrollo. El “Path to Hydrogen Competitiveness”, por ejemplo, estudia los diferentes métodos de producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como sus posibles aplicaciones. De la misma manera, empresas energéticas como Naturgy, a través del libro “Hidrógeno, vector energético de una economía descarbonizada”, aporta un marco teórico muy detallado sobre estos mismos temas. Otros organismos, como Deloitte, Mckinsey&Company, el departamento de energía americano (DOE), o la Unión Europea, entre muchas otros, también se interesan y promueven el desarrollo de esta tecnología en diversos sectores, buscando siempre estar en la línea de la innovación. La información explicada en los estudios de estos organismos será útil para desarrollar el marco teórico que este trabajo requiere, para posteriormente poder hacer predicciones con fundamento. De hecho, en algunos apartados se trabajará sobre bases de datos o estimaciones hechas por estas mismas empresas [7].

Varias instituciones se dedican al desarrollo e investigación del hidrógeno en España. Las intenciones del país acerca de la incursión de esta tecnología en la economía española se recogen en la “Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable”, elaborada por el

gobierno. A través de ella, se pretende establecer las pautas y el rango temporal en el que se deben llevar a cabo ciertas acciones y proyectos que permitan el desarrollo del hidrógeno en el país. Varios de ellos, de hecho, ya se están llevando a cabo por empresas españolas. Por ejemplo, en el puerto de Valencia, a través del proyecto piloto H2Ports y con la ayuda de diversos organismos como el Centro Nacional del Hidrógeno (CNH), se pretende incorporar este vector energético en las operaciones diarias en sus instalaciones, propulsando elementos de su actividad como la maquinaria o el transporte. Como se verá más adelante, la “Hoja de Ruta del Hidrógeno” presenta varios objetivos a cumplir, con el fin de incluir el hidrógeno en la logística y en el transporte de la industria en general.

Además, también son frecuentes los estudios sobre los vehículos eléctricos. Desde universidades como Harvard o Comillas (a través del Observatorio del vehículo eléctrico y la movilidad sostenible), empresas como Tesla, o múltiples trabajos de fin de grado y tesis doctorales, la investigación y desarrollo sobre esta tecnología está permitiendo la correcta transición hacia ella. Desde la Universidad Pontificia de Comillas, por ejemplo, se ha elaborado un estudio predictivo que permite estimar la evolución del parque automovilístico español en los próximos años. Estos datos se usan a lo largo del proyecto como apoyo a las predicciones elaboradas a lo largo de este, y se ilustran en la Figura 3.

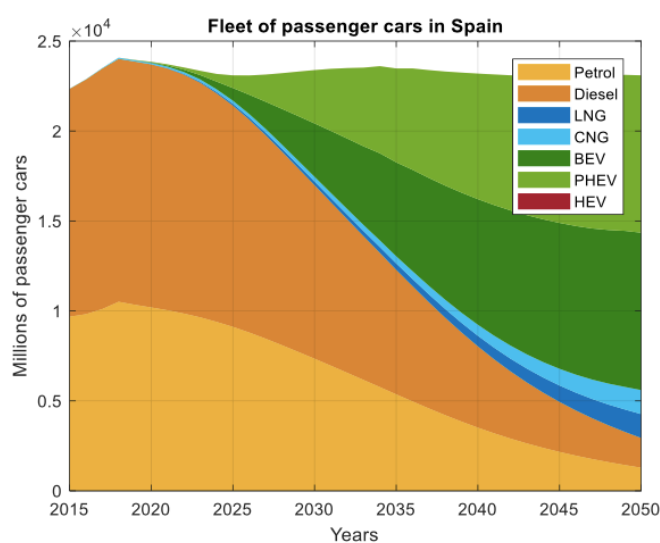


Figura 3. Evolución del número de turismos del parque automovilístico español para las diferentes tipologías de vehículos [10].

Así mismo, se han realizado diversos estudios sobre los precios de las celdas de combustible. Aunque sean escasas las predicciones del precio total de los vehículos de hidrógeno, hay varios estudios que estiman la evolución de los precios de las celdas y otros componentes, como los tanques en los que se deposita el gas. De la misma manera sucede con los precios de los métodos de la producción de hidrógeno renovable, método del cual existe cierta incertidumbre sobre el momento en el que será competitivo con los métodos de producción de hidrógeno contaminantes.

1.2 Motivación del proyecto

El futuro de la movilidad es un tema verdaderamente relevante en la actualidad. La necesidad de planear la correcta transición hacia un transporte más sostenible hace que los expertos centren su atención en investigar las diferentes posibilidades que hay, buscando la alternativa más óptima, y, sobre todo, más respetuosa con el medio ambiente.

Una de estas alternativas es el hidrógeno. Como se ha comentado, a través de él se podrían descarbonizar por completo algunas industrias, y ayudar en la transición hacia la descarbonización de otras. Sin embargo, a pesar de que son numerosos los estudios sobre este compuesto y sus múltiples aplicaciones, hay un sector en el que todavía no se ha investigado lo suficiente su potencial, el transporte. Variedad de trabajos de fin de grado, tesis doctorales, o análisis de empresas y gobiernos se dedican velan por el desarrollo de los vehículos eléctricos. Parece que estos, junto a los híbridos, se han implantado como las principales alternativas para la transición hacia una movilidad más sostenible. Sin embargo, hay otra opción que podría ser más beneficiosa, los vehículos de pila de combustible de hidrógeno.

Este trabajo, por lo tanto, llevará a cabo una comparativa entre los tipos de vehículos presentes en la actualidad, incluyendo los de hidrógeno, y haciendo hincapié en la comparativa entre estos últimos y sus principales competidores, los vehículos

eléctricos. Sin embargo, resulta complicado llegar a conclusiones precisas empleando únicamente los datos actuales. El trabajo también pretende, por lo tanto, estimar como será la evolución de las diferentes características de ambos tipos de vehículos (como el precio, infraestructura de carga, etc), con el fin de concluir en que alternativa podrá ser mejor en el futuro, y cual es el potencial que los vehículos de hidrógeno tienen en la movilidad. Aunque a lo largo del trabajo se harán alusiones a otros países, el marco geográfico del trabajo será principalmente nacional, es decir, en España.

Como se ha visto en el apartado de *Estado del arte*, son múltiples los estudios realizados en el ámbito del hidrógeno como vector energético, y de los vehículos eléctricos. Sin embargo, en la movilidad puede que el hidrógeno tenga más futuro del que se prevé. Por ello, este trabajo ha sido ideado para cubrir la necesidad de elaborar un estudio detallado de esta tecnología, que todavía está en una fase muy temprana de implantación en algunos países como España. El momento de decidir cuál será el futuro de la movilidad es este. Con varias alternativas presentes, no se debe atender solamente a factores económicos (como se hizo hace cien años cuando se apostó por los vehículos de combustión sin tener un plan específico), sino ambientales y sociales. La decisión de apostar por los vehículos de combustión, proliferó en su día la fabricación masiva de estos, y los altos niveles de contaminación que se generan en su utilización, y por los que la sociedad está pagando actualmente.

Este es un momento clave, por lo tanto, para poder decidir que alternativa, o que combinación de ellas es mejor. Las características actuales de los vehículos de hidrógeno son desfavorables, principalmente en cuanto a infraestructura de recarga y costes se refiere. Sin embargo, estos factores podrán verse suavizados con el tiempo. El trabajo también surge, por lo tanto, para ofrecer una predicción aproximada de la evolución que podrán tener algunas de las características principales de tanto los vehículos de hidrógeno como los eléctricos. De esta forma, se facilita el entendimiento del potencial del hidrógeno en el sector transportes, y se cubre el vacío académico que existe acerca del futuro de esta tecnología en la movilidad. Por el bien de un mundo más sostenible, y una

movilidad más eficiente, amable y respetuosa con el medio ambiente, el trabajo pretende ofrecer la información necesaria para ayudar a diseñar el mejor futuro posible del sector transportes.

1.3 Objetivos del proyecto

Atendiendo a los apartados anteriores, los objetivos del proyecto se podrían resumir en cinco puntos principales.

- A. Entender las características del hidrógeno, tanto sus propiedades y posibles aplicaciones, como su funcionamiento como vector energético, y ventajas frente a otras alternativas.
- B. Comparar los diferentes tipos de vehículos existentes actualmente en el mercado. Describir las características actuales de cada uno, y estimar algunas de ellas en el futuro.
- C. Analizar y entender las principales diferencias entre los vehículos eléctricos y los de pila de combustible de hidrógeno.
- D. Predecir la evolución de las principales características de los vehículos eléctricos de batería y los de pila de combustible. Se pretende estimar aquellos rasgos que más peso tendrán en la comparativa entre ambas tecnologías en el futuro.
- E. Estimar el momento en el que los precios de producción de hidrógeno verde se equiparán a los de reformado, y en el que los precios de los vehículos 100 % eléctricos y de pila de combustible se equiparán a los de los vehículos de combustión.
- F. Poder concluir si el hidrógeno tendrá o no cabida en el sector transporte, en base a las estimaciones realizadas.

1.4 Metodología

Para cumplir con estos objetivos, el proyecto tendrá tres partes diferenciadas, que se enumeran a continuación.

- A. Marco teórico del hidrógeno.** Con el fin de entender las predicciones ha realizar al final del trabajo, y de aportar el contexto teórico necesario en el que se encuentra el hidrógeno actualmente, se definen varias características de este vector energético. De entre ellas, se describen principalmente aquellas que más afectan al uso del hidrógeno en la movilidad, como son la seguridad, los tipos de almacenamiento, la producción, o las diferentes aplicaciones dentro del transporte.
- B. Marco teórico del transporte ligero terrestre.** De la misma manera que en el apartado anterior, este punto pretende introducir el marco teórico referente a los tipos de vehículos, necesario para poder llevar a cabo las estimaciones posteriores. En él, se definirán las principales características de los diferentes tipos de vehículos. Se comparará como son en la actualidad, y en algunos casos como podrán ser en el futuro, por lo que esta fase también tiene una cierta componente predictiva.
- C. Estimación.** En este apartado se pretende predecir como evolucionaran algunas de las principales características de los vehículos de pila de combustible y su principal competidor, el vehículo eléctrico de batería. Se emplearán bases de datos de varias empresas, y se contrastarán con el fin de obtener un registro fundamentado. Así mismo, con aquellas variables difíciles de predecir por su escasez de datos, se definirá las intenciones del gobierno para el país. A través de la mencionada “Hoja de Ruta del Hidrógeno”, se podrán analizar algunos de los objetivos descritos en ella.

Como se puede ver, el objetivo final del trabajo es predecir algunas de las variables que más puedan afectar a la posible incursión de los vehículos de hidrógeno en el mercado español, para lo que también se requiere un marco teórico amplio, con el fin de poder comprender las hipótesis sobre las cuales se fundamentan las predicciones. El trabajo, por

lo tanto, cuenta con una importante parte descriptiva, para la cual se ha contrastado información proveniente de diversas fuentes. De esta manera, no sólo se obtienen datos contrastados, sino que se facilita el entendimiento y la síntesis de información. Han servido de especial ayuda para esta parte algunas de las empresas o instituciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, el libro de Naturgy “Hidrógeno, vector Energético de una economía descarbonizada”, ha servido para estructurar algunas de las partes del primer capítulo del trabajo (“EL HIDRÓGENO”), y para obtener información de calidad. Esta información, por supuesto, ha sido contrastada y complementada por variedad de otras fuentes, entre las que se encuentran estudios realizados por empresas como Repsol, instituciones como el DOE americano, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), la Agencia Internacional de la Energía (IEA) o estudios científicos encontrados en diferentes páginas como Dialnet o Researchgate.

Para realizar las hipótesis correspondientes a las predicciones realizadas en la última fase del trabajo, se emplean consideraciones llevadas a cabo por algunas instituciones (en predicciones parecidas), o se presentan hipótesis propias, fundamentadas en la información descrita a lo largo del proyecto. Como herramienta de cálculo para todas las estimaciones realizadas, se ha empleado la hoja de cálculo Excel. Las curvas asociadas a las predicciones hechas se han ajustado a partir de los datos históricos que se han considerado más relevantes e influyentes en la futura evolución de las variables. Además, se ha ajustado las gráficas en base a hipótesis que ayudan a determinar la forma potencial de la gráfica en el futuro. De entre ellas, se podrá observar como para algunas figuras se ha ajustado el tipo de gráfica “potencial”, y para otras una “polinómica”, en función de lo que se ha considerado que más realísticamente reflejará la evolución de estas variables en el futuro.

2 EL HIDRÓGENO

2.1 Propiedades y seguridad

El hidrógeno se encuentra principalmente en forma de gas en la tierra, y aunque no existe de forma libre, constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo. Aunque su densidad energética gravimétrica (valor de energía por unidad de masa) es la mayor de todos los combustibles, al ser un gas extremadamente ligero (siendo el de menor densidad de la tabla periódica, con un valor de $0,0899 \text{ kg/m}^3$), la densidad energética volumétrica resulta siendo muy baja [11].

Para aumentar su densidad, el hidrógeno se puede comprimir, licuar, incorporar a compuestos químicos, o transformarlo en otros, por lo que la elección del método depende de la aplicación final a la que se destine. Mientras que en la movilidad el limitado peso y espacio exigen que sea presurizarlo a altas presiones o licuado, en las aplicaciones más estacionarias, como la generación de energía eléctrica o el aporte de calor, estas restricciones generalmente no son tan acentuadas. El principal problema de los métodos de almacenamiento son sus elevados costes, la seguridad que deben garantizar, y los complejos procesos previos requeridos para transformar el hidrógeno en sus diferentes estados [11]. En la Tabla 1 se pueden apreciar estas características.

Variables		Densidad (kg/m^3)	Densidad energética gravimétrica (MJ/kg)	Densidad energética volumétrica (MJ/l)
T_0	P_0	0,0899	119	0,01
T_0	$P = 350 \text{ bar}$	24,4	119	2,9
T_0	$P = 700 \text{ bar}$	40,3	119	4,8
Licuado		71,4	119	8,5

Tabla 1. Densidades energéticas gravimétricas y volumétricas del hidrógeno para diferentes estados de presión y temperatura, donde T_0 = Temperatura ambiente, y P_0 = Presión ambiente. [12]

En cuanto a la seguridad, el hidrógeno (como todo combustible), cuenta con algunas características a considerar. La intención de introducir este vector energético en el sector transporte, incrementa la preocupación de los usuarios, que se ven intimidados por el supuesto riesgo de explosión de los depósitos de hidrógeno a bordo de los vehículos de pila de combustible. A pesar de no ser un compuesto nuevo en la industria, sí se encuentra en fase de desarrollo en el sector automovilístico. En los vehículos de pila de combustible, los depósitos de hidrógeno guardan una menor distancia con las personas que en el resto de las aplicaciones en las que se emplea este compuesto, y de ahí la preocupación de los usuarios [13]. A continuación se comentarán algunas de las características principales de este vector energético.

La molécula de hidrógeno es la más pequeña en el universo, lo que le otorga una mayor facilidad para fugarse por juntas o orificios pequeños (teniendo el doble de capacidad de fuga que el gas natural). Sin embargo, en una comparativa con este último combustible, como la densidad energética volumétrica del gas triplica a la del hidrógeno, en caso de fuga se liberaría más energía en el caso del gas que en el del hidrógeno, a pesar de liberar menos masa [13].

Otros factores a considerar cuando se debate sobre la seguridad de los depósitos de hidrógeno, son la densidad y difusión de este. Este es un gas mucho más ligero que el aire, por lo que, ante una fuga, se elevaría y dispersaría rápidamente hacia la atmósfera. Otros combustibles de mayor densidad, como la gasolina, el propano o el butano, reposarían a ras de suelo ante una fuga, pudiendo derivar en situaciones más peligrosas en caso de ignición. En un vehículo, el combustible convencional (diésel o gasolina) se fugaría y reposaría en el suelo, pudiendo quemar el vehículo en caso de prenderse. En el caso de un vehículo de pila de combustible, el hidrógeno no sólo se prendería hacia el aire rápidamente, sino que se difundiría y desaparecería a un ritmo mayor [13],[14]. En la Tabla 2 se pueden apreciar los principales parámetros relacionados con la seguridad del hidrógeno, en comparativa con algunos combustibles convencionales.

	Densidad (kg/m ³)	Límites de inflamabilidad (% vol)	Temperatura Autoignición (°C)	Mínima energía ignición (mJ)	Temperatura llama (°C)	Coeficiente de difusión (cm ³ /s)
Hidrógeno	0,0899	4 – 75 %	536 – 585	0,021 a 29%	2045 - 2403	0,61
Metano	0,656	5,3 – 15 %	537	0,21 a 8,5 %	1914	0,16
Butano	573	1,6 – 8,4 %	405	0,25 a 4,7 %	-	-
Propano	493	2,1 – 9,5 %	480	0,25 a 2 %	1925	-
Gasolina	720	1,0 – 7,6 %	247	0,29 a 2 %	2307	0,05
Diesel	850	0,6 – 7,5 %	210	-	2327	-

Tabla 2. Propiedades del hidrógeno y otros combustibles a temperatura y presión ambiente [15]

En primer lugar, se define como límite de inflamabilidad el intervalo de concentración combustible/aire a partir del cuál se puede llevar a cabo la combustión. Aunque el intervalo de inflamabilidad del hidrógeno sea prácticamente el más amplio, el dato de interés en el estudio de fugas es el límite inferior del intervalo, es decir, el porcentaje de combustible mínimo en el aire para que este se pueda inflamar. Se aprecia cómo el límite inferior del hidrógeno es el segundo más alto, siendo hasta cuatro veces superior al de la gasolina, y necesitando por lo tanto un porcentaje de aire mayor que el que necesitan varios de los combustibles convencionales [15].

En cuanto a la energía de ignición (cantidad mínima de energía necesaria para que se pueda dar la combustión de una mezcla inflamable), destaca por ser mucho inferior a la de los demás combustibles. En la tabla viene dada para un porcentaje de combustible sobre aire concreto. Estos datos varían con la presión y temperatura, pero los números mostrados en la tabla (a temperatura y presión atmosféricas, 25°C y 1 bar), sirven como referencia para llevar a cabo una comparación. A pesar de su reducido valor, el porcentaje de hidrógeno para el cuál se necesita esa energía es del 29 %, que resulta muy improbable de producirse en una fuga debido a la alta difusión y baja densidad del gas (que le harían

ascender rápidamente sin llegar a formar grandes concentraciones). Por ejemplo, para el caso de un porcentaje de mezcla de hidrógeno con aire del valor del límite inferior de inflamabilidad del H_2 , la energía de ignición es del orden de la del gas natural [13], [15].

Por último, la temperatura de autoignición se define como la temperatura a la cual un gas, en contacto con aire, arde sin necesidad de una fuente de calor externa, dependiendo de variables como la concentración del gas, o la presión. Aún así, se puede ver como para valores de presión y temperatura ambiente, la temperatura de autoignición del hidrógeno es muy superior a la de la gasolina o el gasóleo, por lo que no debería de ser un motivo de preocupación en los vehículos. El inconveniente del hidrogeno en caso de arder es que sus llamas son prácticamente invisibles, ya que los únicos resultados de su combustión son el calor y el vapor de agua. Lo único que podría inducir algo de colaboración visual a la llama podrían ser impurezas del aire, pero en todo caso demasiado pequeñas como para poder verlas a simple vista [13].

2.2 Almacenamiento

2.2.1 Hidrógeno gaseoso comprimido

El hidrógeno gaseoso comprimido, que representa la principal forma de almacenamiento de hidrógeno en la movilidad, requiere ser llevado a presiones que oscilan entre los 350 y 700 bares. Para poder estimar la rentabilidad de comprimir el hidrógeno, se calculará el valor de la densidad energética volumétrica de este para diferentes valores de presión y temperatura, con el fin de llevar a cabo una comparación con el caso a condiciones ambientales. Para ello, es necesario introducir brevemente algunos conceptos del comportamiento de los gases.

2.2.1.1 Comportamiento general de los gases

Por definición de los gases ideales, la densidad es proporcional a la presión para una temperatura y volumen dados, atendiendo a la ecuación $p \cdot v = n \cdot R \cdot T$. Sin embargo, teniendo en cuenta que esta ley es una aproximación, y que a altas presiones se desemeja especialmente de la realidad, se debe introducir el factor de compresibilidad “Z” a la ecuación, quedando esta como $p \cdot v = Z \cdot n \cdot R \cdot T$.

El factor de compresibilidad “Z” representa el valor molar del gas real entre el valor molar del gas ideal para unas mismas condiciones. Este depende de la temperatura y la presión, por lo que se trabaja con la Tabla 3.

El modelo de gas ideal supone que las partículas no se atraen ni repelen entre sí, interaccionando mediante choques perfectamente elásticos, lo cual sólo se cumple de forma aproximada a bajas presiones. En condiciones de alta presión o baja temperatura, las moléculas se encuentran más cercanas y las fuerzas de atracción y repulsión son más relevantes. La Figura 4 muestra el valor de la densidad del hidrógeno como gas ideal y real en función de la presión. La Tabla 3 muestra los valores del factor de compresibilidad para obtener el valor de Z en función de la presión y temperatura, y se emplea para llevar a cabo la Figura 4 con los datos a temperatura ambiente [16].

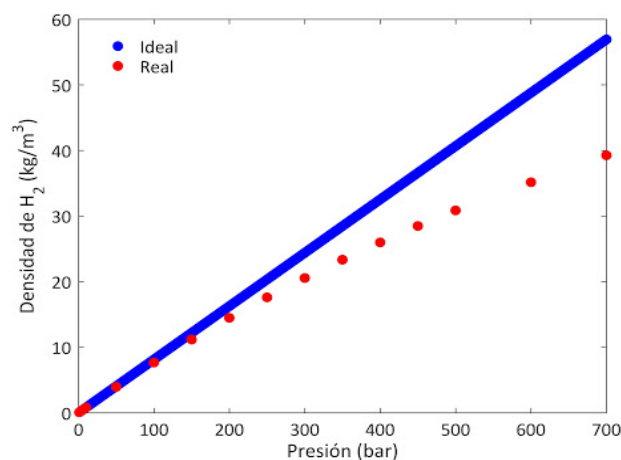


Figura 4. Densidad del hidrógeno en función de la presión para el caso de gas ideal y de gas real, considerando el factor de compresibilidad “Z”. Se considera temperatura ambiente [16]

Presión (bar)	Temperatura (K)						
	250	273.15	298.15	350	400	450	500
1	1.00070	1.00040	1.00060	1.00055	1.00047	1.00041	1.00041
5	1.00337	1.00319	1.00304	1.00270	1.00241	1.00219	1.00196
10	1.00672	1.00643	1.00605	1.00540	1.00484	1.00435	1.00395
50	1.03387	1.03235	1.03037	1.02701	1.02411	1.02159	1.01957
100	1.06879	1.06520	1.06127	1.05369	1.04807	1.04314	1.03921
150	1.10404	1.09795	1.09189	1.08070	1.07200	1.06523	1.05836
200	1.14056	1.13177	1.12320	1.10814	1.09631	1.08625	1.07849
250	1.17789	1.16617	1.15499	1.13543	1.12034	1.10793	1.08764
300	1.21592	1.20101	1.18716	1.16300	1.14456	1.12957	1.11699
350	1.25461	1.23652	1.21936	1.19051	1.16877	1.15112	1.13648
400	1.29379	1.27220	1.25205	1.21842	1.19317	1.17267	1.15588
450	1.33332	1.30820	1.28487	1.24634	1.21739	1.19439	1.17533
500	1.37284	1.34392	1.31784	1.27398	1.24173	1.21583	1.19463
600	1.45188	1.41618	1.38797	1.33010	1.29040	1.25920	1.23373
700	1.53161	1.48880	1.44991	1.38593	1.33914	1.30236	1.27226

Tabla 3. Valor del factor de compresibilidad del hidrógeno a distintas presiones y temperaturas [16]

2.2.1.2 Cálculo de la densidad energética volumétrica del hidrógeno para diferentes condiciones

Por lo tanto, se realizan los cálculos para presiones de 350 y 700 bar. Para los valores de densidad en función de la presión, se emplean los datos con los que se realizó la Figura 4. La densidad energética gravimétrica del hidrógeno se mantiene constante para cualquier condición, con un valor de 119 MJ/kg. La razón por la que a 700 bares el resultado obtenido no es el doble que a 350 es por la no linealidad del factor de compresibilidad. Se añaden también los valores a temperatura y presión ambientes.

- **P = 350 bares.**

Densidad = 24,4 kg/m³,

Densidad energética volumétrica = densidad energética gravimétrica (MJ/kg) ·

densidad (kg/m³) = 119 MJ/kg · 24,4 kg/m³ = 2903,6 MJ/m³ ≈ 2,9 MJ/l.

- **P = 700 bares.**

Densidad = 40,3 kg/m³,

Densidad energética volumétrica = densidad energética gravimétrica (MJ/kg) · densidad (kg/m³) = 119 MJ/kg · 40,3 kg/m³ = 4795,7 MJ/m³ ≈ 4,8 MJ/l.

- **P = P₀ = 1 bar.**

Densidad = 0,0899 kg/m³,

Densidad energética volumétrica = densidad energética gravimétrica (MJ/kg) · densidad (kg/m³) = 119 MJ/kg · 0,0899 kg/m³ = 10,7 MJ/m³ ≈ 0,011 MJ/l.

Por lo tanto, para almacenar la misma cantidad energética, se requiere un volumen 264 veces mayor a condiciones ambiente que a 350 bar, 436 veces mayor a condiciones ambiente que a 700 bar, y 1,66 veces mayor a 350 bar que a 700. Por ello, aunque la presurización del hidrógeno como método de almacenamiento se requiere en prácticamente todas las aplicaciones de este, es especialmente necesario para aquellas en las que el volumen sea un factor determinante. El hidrógeno comprimido es típicamente usado en el sector de transportes, donde el espacio es limitado, y los vehículos llevan depósitos a 350 o 700 bares, dependiendo de la autonomía requerida.

2.2.1.3 Tipos de depósitos de hidrógeno gaseoso comprimido

Para diseñar el almacenamiento del gas presurizado, se atiende principalmente a la aplicación a la que se destine el hidrógeno, y a criterios de seguridad y eficiencia. En la movilidad, por ejemplo, lo óptimo es emplear depósitos de pesos y volúmenes reducidos (siendo este último factor el más determinante), para lo que se presuriza o licúa el hidrógeno para aumentar su densidad energética volumétrica. En otras aplicaciones, como en el aporte de calor doméstico o industrial, puede que estos requerimientos no sean tan acentuados.

Además, los tanques de hidrógeno a bordo de los vehículos deben de tener otras condiciones especiales, como son la capacidad de soportar varios ciclos de carga y

descarga, la resistencia de los materiales del depósito a la fragilización por hidrógeno, y capacidad para la contener correctamente este compuesto. El reducido tamaño de las partículas de hidrógeno exige a los materiales interiores del depósito a tener que ser reforzados para evitar la difusión del gas, es decir, la capacidad de algunos elementos de permear a través de distintos materiales [13]. En la Tabla 4 se detallarán los distintos tipos de tanques empleados para almacenar hidrógeno en la automoción.

Tipo de tanque	Material interior	Presiones admitidas (bar)	Revestimiento o costuras interiores	Características	Aplicación
Tipo I	Aluminio /aluminio	150 - 200	No	Elevado peso Capacidad gravimétrica: 1% Precio: 250 €/kg a 200 bar	Estacionarias, laboratorios, Vehículos GNC
Tipo II	Acero o aluminio	450 - 800	Revestimiento: fibra de carbono o vidrio	Refuerzo soporta la misma carga estructural que metal Reduce peso	Hidrogeneras
Tipo III	Aluminio	119	Revestimiento: fibra de carbono	Revestimiento soporta más carga que metal Reduce peso Precio: 1000 €/kg a 350 bar, y Precio: 1700 €/kg a 700 bar	Vehículos H ₂
Tipo IV	Plástico	119	Forro interior: plástico alta densidad Fibras de carbono alrededor del forro	Forro: Evitar difusión Fibras: Carga estructural Capacidad gravimétrica: 11%	Vehículos H ₂

Tabla 4. Tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido [11] [16]

Las costuras o forros interiores tienen la finalidad de evitar la difusión del hidrógeno. A bajas presiones (como sucede en los tanques tipos I y II), no se requiere de estas costuras porque la capacidad de difusión es menor, al no haber tanta presión. La capacidad gravimétrica de los depósitos se refiere al porcentaje de peso que tiene el gas almacenado respecto al peso total. Para aquellos depósitos cuyo material interior es metal, el peso es mayor, reduciendo así su capacidad gravimétrica. El principal motivo por el

que no se usan depósitos de tipo III para fines estacionarios a baja presión es por su elevado precio.

La principal ventaja del tanque tipo IV es su reducido peso, al no contar con metales en su estructura. Sin embargo, el forro interior de plástico no cumple con la misma eficacia como barrera de la difusión del gas en comparación con los metales, y el requerimiento de una elevada cantidad de fibra de carbono aumenta su precio. Lo mismo sucede con el tanque tipo III, aunque en menor medida.

Por lo tanto, en función de la aplicación para la que se destina cada depósito, se utiliza uno u otro. Para los vehículos, por ejemplo, en los que el peso y volumen son factores limitantes, se emplean depósitos de tipo III o IV, que, aunque son más caros que los otros, ofrecen una capacidad volumétrica y gravimétrica mucho mejor. Para aplicaciones más estacionarias, en las que los requerimientos de espacio y peso no son tan limitantes, es común encontrarse con los depósitos del tipo I o II.

2.2.2 Hidrógeno líquido

El objetivo de licuar el hidrógeno es el de aumentar su densidad respecto al caso presurizado, incrementando así su densidad energética volumétrica. El principal inconveniente de llevar el hidrógeno a este estado es que requiere de un gasto energético mayor, debido a la baja temperatura de ebullición de este a presión atmosférica, de -252,8 °C, considerada como temperatura criogénica (por debajo de -150 °C). Sin embargo, la densidad del hidrógeno es de 70,8 kg/m³, obteniendo así una densidad energética volumétrica de 8,4 MJ/l, un 75% superior al caso a 700 bares.

- **Hidrógeno líquido (T = -253 °C, P = 1 bar)**

Densidad = 70,8 kg/m³,

Densidad energética volumétrica = densidad energética gravimétrica (MJ/kg) · kg/m³ = 119 MJ/kg · 70,8 kg/m³ = 8425,2 MJ/m³ ≈ 8,4

El coste asociado a este método de almacenamiento reside también en la necesidad de emplear un buen aislante para mantener la temperatura en el valor previsto. Sin embargo, es una técnica comúnmente empleada para transportar el hidrógeno en cisterna o en barco, especialmente útil para largas distancias en las que una red de tuberías para transportar el hidrógeno gaseoso sería especialmente costosa. En el sector automovilístico, sin embargo, todavía está en fase de desarrollo y perfeccionamiento [11].

Aunque los tanques empleados están diseñados para evitar la transferencia de calor lo máximo posible, es imposible ofrecer una resistencia térmica infinita. Esto implica que el hidrógeno licuado no puede mantenerse en los tanques indefinidamente, sino que, ante una pequeña transferencia de calor, la presión aumenta y una parte del hidrógeno se gasifica, pudiendo escapar al exterior a través de una válvula de alivio, lo que se denomina como “boil-off” (hervir). Por ello, es necesario que el hidrógeno almacenado en los tanques criogénicos sea usado en un periodo de tiempo no excesivamente largo [11].

2.2.3 Otros métodos de almacenamiento

Como contrapartida al problema asociado a la necesidad de presurizar o licuar el hidrógeno, surge el método de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos. A través de una reacción química, estas aleaciones metálicas absorben el hidrógeno formando compuestos sólidos y generando calor. El proceso es reversible, y así como se pueden combinar los dos elementos, también se pueden separar de forma rápida aportando calor. Tienen la ventaja de que el hidrógeno se puede almacenar en estos hidruros formando metales sólidos que pueden estar a temperatura y presión ambiente. Sus desventajas son el elevado peso y coste, motivos por los cuales no son empleados en la movilidad [11], [17].

Por último, algunos fabricantes apuntan a la posibilidad de almacenar hidrógeno en nanotubos de carbono, en los cuales se podrían almacenar grandes cantidades de

hidrógeno en estructuras de grafito microscópicas con forma de tubo. De todos modos, todavía quedan muchos avances y demostraciones por hacer en el campo [17].

2.2.4 Comparativa entre métodos y nuevas tecnologías

La Tabla 5 muestra el consumo energético necesario para llevar el hidrógeno a los diferentes estados requeridos en cada método de almacenamiento. Se puede observar cómo destaca el porcentaje de energía primaria del hidrógeno consumida en el proceso de licuefacción, que cuadruplica la consumida en el proceso de compresión a 700 bares. Para calcular los porcentajes, se ha tenido en cuenta como energía primaria del hidrógeno su poder calorífico inferior (PCI), de 119 MJ/kg, equivalente a 33,3 kWh/kg.

	Consumo eléctrico (kWh/kg H ₂)	Porcentaje de energía primaria consumida en el proceso
H ₂ a 500 bar	2,6	7,8 %
H ₂ a 900 bar	3,5	10,5 %
Licuefacción	13	39%

Tabla 5. Consumo energético en los procesos de compresión y licuefacción del hidrógeno [11].

Por último, algunas líneas de investigación tratan de desarrollar la alternativa del hidrógeno comprimido criogénico. Atendiendo a la fórmula de los gases explicada anteriormente, se puede ver como la densidad de estos no depende sólo de la presión, sino también de la temperatura para un cierto volumen. Por lo tanto, en vez de presurizar el hidrógeno a una temperatura cercana a la ambiente, se propone además disminuirla con el fin de aumentar la densidad (pues son inversamente proporcionales). La desventaja de esta tecnología es la gran ingesta de energía requerida para mantener ambas condiciones (presión y temperatura), en valores que no son los ambientes. En la Figura 5 se puede ver como la densidad del hidrógeno crio-comprimido es mucho mayor que la del comprimido y algo mayor que en estado líquido

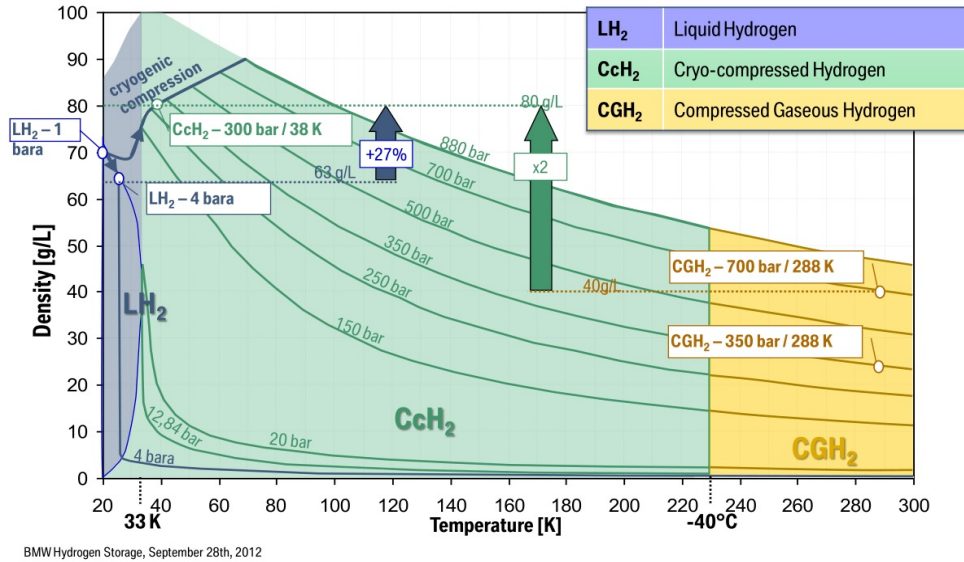


Figura 5. Densidad del hidrógeno en función de la presión y la temperatura [18] [19]

2.3 Hidrógeno frente a otros combustibles

El presente apartado pretende establecer una comparativa del valor energético del hidrógeno frente a los combustibles convencionales, prestando especial atención a su efecto sobre la movilidad. Para ello, se considerarán los tres estados en los que a día de hoy se puede encontrar el hidrógeno en el transporte terrestre: presurizado a 350 bar, a 700 bar, o licuado.

La Figura 6 muestra la comparativa de las densidades energéticas gravimétrica y volumétrica entre los principales combustibles actuales. En general se puede ver como, a pesar de presurizar o licuar el hidrógeno, la densidad energética volumétrica sigue siendo inferior a la de los combustibles convencionales.

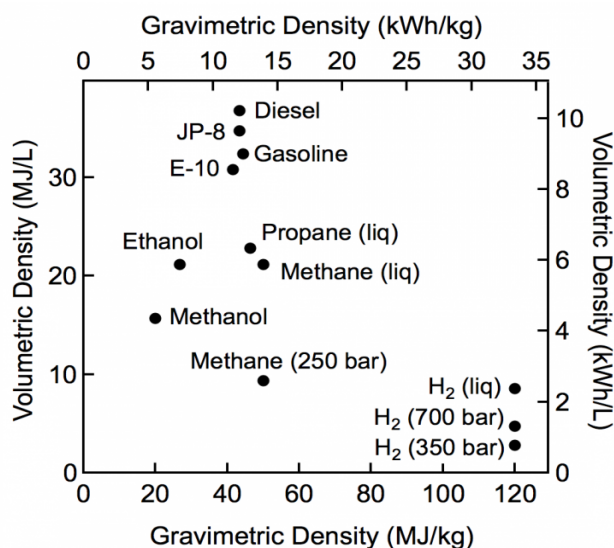


Figura 6. Densidades energéticas gravimétrica y volumétrica de diferentes combustibles

En la Tabla 6, se estima el volumen necesario para que un coche tipo medio recorra 900 km según las diferentes tipologías de vehículos en la actualidad. Se observa como el requerimiento de espacio es muy acentuado en el almacenamiento de hidrógeno a 350 bar. De hecho, este volumen podría ser mayor que el de un maletero típico de un vehículo urbano (220 litros), o hasta el 60% del de un coche tipo berlina (500 litros). Por ello, el hidrógeno suele comprimirse a 700 bares, ofreciendo así una reducción de casi un 40% en volumen requerido respecto al caso anterior. El volumen necesario en este caso, sería el de un 80% del maletero de un vehículo urbano, y de un 36% de una coche tipo berlina [20]. El resto de los combustibles presentan requerimientos de espacio de similar magnitud entre ellos.

	Densidad (kg/m ³)	Consumo (kg/100km)	Consumo (l/100km)	Volumen requerido (l)	Peso combustible (kg)
H2 a 350 bar	24,4	0,8	32,8	295,1	7,2
H2 a 700 bar	40,3	0,8	19,9	178,7	7,2
H2 líquido	70,8	0,8	11,3	101,7	7,2

Gasolina	750	4,7	6,25	56,3	42,3
Diésel	850	4,17	4,9	44,1	37,5
GNC	190	0,93	4,9	44,1	8,4
GLP	560	4,82	8,6	77,4	43,4

Tabla 6. Comparativa de diferentes tipos de combustibles [21], [22], [23]

2.4 Producción

La condición de compuesto “inagotable” con la que se considera al hidrógeno, es una de las razones por las que podrá ser uno de los vectores energéticos del futuro. Sin embargo, la elección del correcto método de producción resulta de elevada importancia atendiendo a aspectos medioambientales. Aunque existe una gran variedad de alternativas de producción de hidrógeno, la mayoría de ellas tienen un impacto ambiental que sería difícil de sostener si se desarrollan a gran escala.

De hecho, actualmente sólo un pequeño porcentaje del hidrógeno producido se genera sin emisiones de dióxido de carbono, sino que la gran mayoría se produce de formas contaminantes. La principal razón es la ventaja económica que estos métodos tienen respecto a los más respetuosos con el medio ambiente, debido en parte a que a estos últimos les falta desarrollarse a gran escala. La Figura 8 pretende ilustrar los diferentes métodos de producción de hidrógeno en función de la procedencia de la energía empleada. A continuación, se explicarán los diferentes métodos más comunes hoy en día.

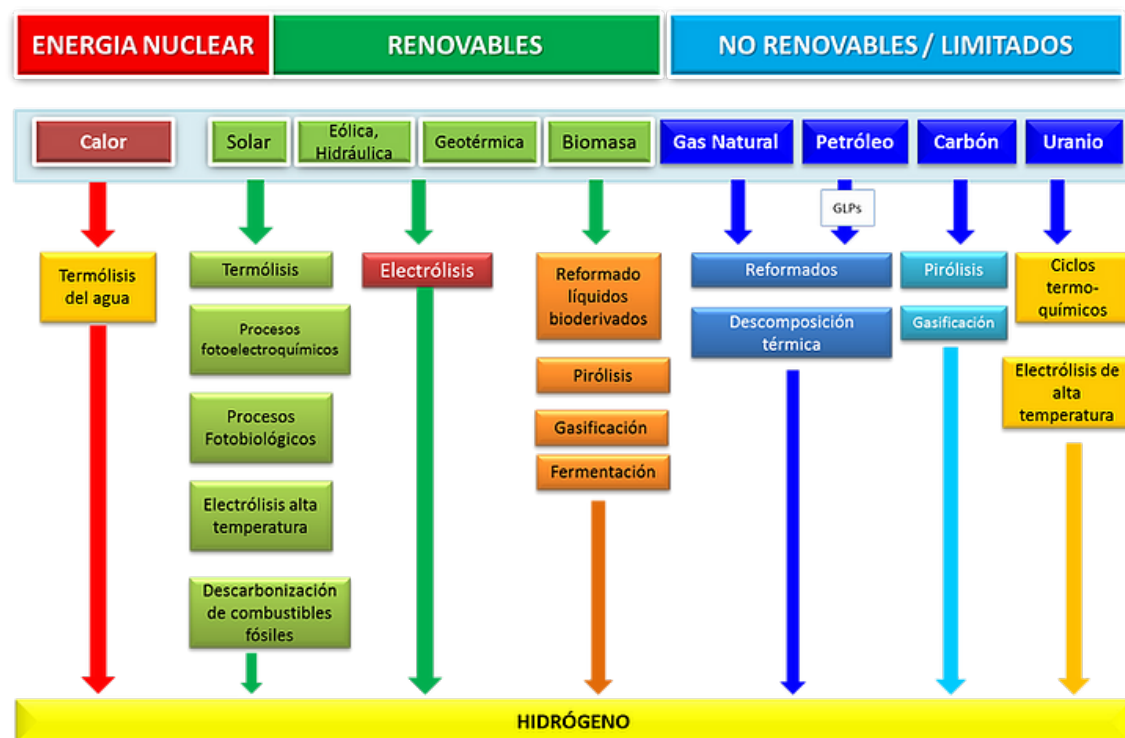


Figura 7. Procesos para la producción de hidrógeno clasificados según la fuente de energía [24]

2.4.1 Procesos a partir del gas natural

2.4.1.1 Procesos de reformado

Los procesos de reformado son los más comunes en la actualidad para la obtención de hidrógeno, representando alrededor del 50% de todos los procesos. Se distinguen principalmente en un factor, su comportamiento termoquímico. Es decir, mientras que algunos de ellos necesitan un aporte externo de energía en forma de calor durante el proceso (endotérmicos), otro lo liberan (exotérmicos).

El reformado con vapor de agua es el método de producción de hidrógeno más empleado y económico en la actualidad. Aunque se le puede realizar a varios hidrocarburos (GLP, hidrocarburos líquidos, etc), el combustible empleado más habitual es el gas natural, debido a su facilidad de manejo y gran disponibilidad. El principio de

funcionamiento de cualquier proceso de reformado se basa en la descomposición de la molécula de metano (CH_4) en hidrógeno y óxidos de carbono (CO y CO_2). Para ello, tres condiciones son requeridas: altas temperaturas (700°C - 1100°C), un agente oxidante (agua y/o aire), y un catalizador, que suele ser níquel. El agente oxidante más empleado es el agua, e interviene en dos fases del proceso. A continuación se explican las cuatro fases correspondientes a un proceso de reformado con vapor de agua [11].

1. **Desulfuración:** Proceso previo de limpiado del gas natural de impurezas (para evitar el deterioro de los agentes catalíticos), que en su mayoría consisten en azufre. Se elimina más del 99% de este.
2. **Reformado:** Sobre un lecho catalítico en base níquel, el vapor de agua ayuda a descomponer el metano (CH_4) en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2), en un proceso a 900°C . Se trata de un proceso endotérmico, con un incremento de entalpía de $\Delta h = 206,14 \text{ kJ/mol}$.
3. **Desplazamiento:** En la unidad de desplazamiento, se aprovecha el CO producido en la fase anterior para hacerlo reaccionar con agua, generando más H_2 y CO_2 . El proceso es exotérmico, donde $\Delta h = -41,17 \text{ kJ/mol}$, y no requiere de tan elevadas temperaturas. La liberación de energía no es lo suficientemente grande como para satisfacer la demanda energética de la fase anterior, pero sí ayuda a reducir el consumo de combustible necesario para alcanzar las elevadas temperaturas requeridas en esta..
4. **Purificación:** El purificador separa el hidrógeno del resto de la mezcla, que, aunque en su gran mayoría es dióxido de carbono, también contiene algunas impurezas de metano y monóxido de carbono (no más de un 1%).

A continuación, se ilustra la estequiometría de los pasos de reformado y desplazamiento que sigue el gas natural, así como un esquema general del proceso conjunto (Figura 8).

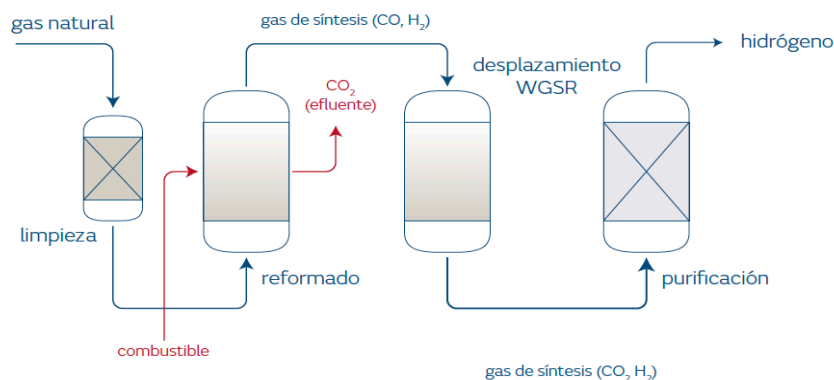
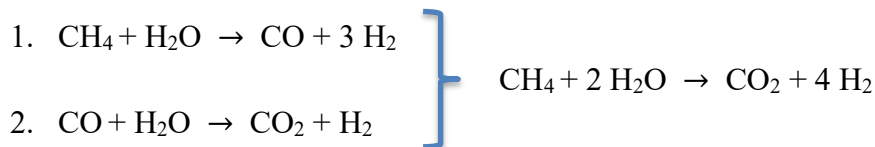


Figura 8. Proceso de generación de hidrógeno por reformado de gas natural [11]

Se observa como, por cada mol de CO_2 emitido, se generan cuatro moles de H_2 . Sin embargo, como el peso molecular del hidrógeno es muy bajo, en cantidades másicas en realidad se generan entorno a 5,5 veces más dióxido de carbón que de hidrógeno en cada reacción. La Tabla 7 pretende ilustrar este hecho.

	Masa atómica (g/mol)	Nº moles producido (mol)	Masa producida (g)
H_2	2	4	8
CO_2	44	1	44

Tabla 7. Cantidad molar y másica de CO_2 emitido por un mol de H_2 [25]

Por lo tanto, el proceso genera más producto indeseado que deseado (5,5 gramos de CO_2 por gramo de H_2), ya que el dióxido de carbono es un gas contribuyente al efecto invernadero. Pero, además, deben de ser consideradas también las emisiones producidas por la quema del combustible necesario para alcanzar las temperaturas requeridas en el proceso. Por lo tanto, se estima que, por cada tonelada de hidrógeno, se emiten entre

nueve y once toneladas de CO₂ totales. Como solución, varias plantas de reformado capturan el dióxido de carbono producido, hecho por el cual este se clasifica como gris o azul. Teniendo en cuenta todos estos procesos, la eficiencia del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua, se estima en un 80% [11].

Otro método de producción de hidrógeno a partir del gas natural es la oxidación parcial del metano, que consiste en el mismo proceso de reformado, con las diferencias de que el agente oxidante es oxígeno o aire, y la cantidad de este es insuficiente como para lograr la combustión completa del metano. En la mayoría de los casos se emplea aire (a no ser que se requiera de una alta pureza del H₂ producido). La principal ventaja de este proceso reside en su condición de exotérmico ($\Delta H = - 36 \text{ kJ/mol}$), permitiendo prescindir de fuentes de energía externas para obtener las temperaturas necesarias. Así mismo, el monóxido de carbono (CO) producido, se puede desplazar con agua como en el proceso anterior, formando más H₂ y CO₂. La eficiencia del proceso se estima en un 70%, y sus posibles fases se muestran a continuación [26], [27].



El último método de producción de hidrógeno a partir del gas natural es el reformado autotérmico, que se trata de una combinación de los dos procesos anteriores. En él, se aprovecha la energía liberada en el proceso de oxidación parcial para ayudar a conseguir las temperaturas requeridas en el proceso de reformado con vapor. Además, el gas producido en la oxidación parcial (gas de síntesis, que está compuesto mayoritariamente por CO) se lleva a la unidad de desplazamiento del primer reformador para producir más hidrógeno y dióxido de carbono. Su eficiencia está en torno al 70%.

2.4.1.2 Pirólisis

La pirólisis, en general, consiste en la descomposición de un combustible mediante la acción calor y en ausencia de oxígeno. Los principales combustibles utilizados son sólidos (biomasa y carbón), siendo las temperaturas requeridas para su descomposición de 450°C y 1200 °C respectivamente. Los productos obtenidos del proceso dependen de la temperatura, presión, y características del combustible utilizado, pero suelen ser gases compuestos por CO, CO₂, H₂, hidrocarburos, y residuos sólidos carbonosos (coque). El gas producido, que es el portador del hidrógeno, sigue las mismas dos últimas etapas del proceso de reformado con vapor: desplazamiento y purificación [11].

La pirólisis del gas natural permite la descomposición del metano (CH₄) en hidrógeno (H₂) y carbón (C), en un proceso sin presencia de ningún agente oxidante, donde el único residuo del proceso es coque. El proceso es endotérmico ($\Delta H = 74.85$ kJ/mol), y requiere de elevadas temperaturas (entre 800 y 1200 °C), por lo que se está investigando para cumplir el objetivo de obtener la energía necesaria mediante corriente eléctrica en vez de térmica, de tal forma que el proceso se pueda considerar renovable. En la reacción se obtienen, por lo tanto, dos moles de hidrógeno por cada mol de carbón, como se puede ver a continuación [11].



2.4.2 Procesos a partir del agua

2.4.2.1 Electrólisis

La electrólisis es al proceso por el cual se rompe la molécula de agua mediante una corriente eléctrica. El electrolizador es un dispositivo electroquímico que convierte la energía eléctrica en energía química, y en algunos casos también en energía térmica (puesto que es más óptimo trabajar a altas temperaturas). La principal ventaja de este método es que, si la electricidad procede de fuentes renovables, su balance total de

emisiones es nulo. Uno de los principales obstáculos para la proliferación de este método tiene que ver con de la gran estabilidad de la molécula del agua, puesto que, debido a ella, se requieren ingestas de energía eléctrica muy importantes para ser separada (286,45 kJ/mol a 25 °C) [26]. Sin embargo, se sabe que, a elevadas temperaturas, la energía eléctrica requerida por el proceso puede ser sustituida por energía térmica, pudiendo, por lo tanto, emplear calor residual de otros procesos y reducir el consumo eléctrico de la planta. Otras fuentes de calor que no suponen emisiones podrían ser la energía solar concentrada y la energía nuclear [11], [26].

En la Tabla 8 se puede observar como a 1000 °C, la ingesta de electricidad necesaria para llevar a cabo el proceso se reduce en un 25% respecto al caso con temperatura ambiente. Como contrapartida, la energía total consumida en el proceso aumenta un 16%, reduciendo así la eficiencia global. Esto es debido a la mayor resistencia de la molécula de agua a ser separada a mayores temperaturas. Sin embargo, en caso de contar con una fuente de calor residual, la ingesta de electricidad necesaria para llevar a cabo el proceso disminuiría, y con ella sus costes asociados (que representan los principales costes de estas plantas).

p (bar)	T (°C)	Valores teóricos de:			
		Electricidad necesaria (GJ/GJ H ₂)	Calor necesario (GJ/GJ H ₂)	Energía total necesaria (GJ/GJ H ₂)	Eficiencia Global (%)
1	25	0.98	0.20	1.18	84.6
1	1000	0.74	0.63	1.37	73.1
400	25	1.07	0.20	1.27	78.6

Tabla 8. Valores teóricos de energía primaria necesaria y eficiencia de la electrólisis de agua en función de la presión y temperatura de la operación.

A primera vista, parece inadecuado realizar el proceso a altas presiones. Sin embargo, la principal ventaja de esta alternativa, que tiene una eficiencia global inferior al proceso a presión y temperatura ambiente, es que el hidrógeno producido ya se encuentra comprimido. Esta alternativa, por lo tanto, permite prescindir del posterior

proceso de compresión que se suele realizar al hidrógeno con el fin de ser almacenado o transportado más fácilmente. A pesar de que la ingesta energética es mayor, dependiendo del caso podría ser útil.

Por lo tanto, sería necesario llevar a cabo un análisis de costes con el fin de que alternativa es más rentable. Los siguientes factores son importantes en el análisis: cantidad de hidrógeno a producir, presencia o no de calor residual, costes de compresión, y precio de la electricidad. En la Figura 9 se puede apreciar la diferencia de costes entre una planta electrolítica desarrollada a gran escala, y otra a pequeña. El principal elemento diferenciador tiene que ver con el almacenamiento del hidrógeno. Mientras el precio de la electricidad, del electrolizador, del compresor, y de operación son similares, el precio unitario (\$/kg) de almacenamiento del hidrógeno es mucho mayor en el caso de la planta con poca producción. Por lo tanto, en esta última podría ser útil presurizar el hidrógeno en el propio proceso de electrólisis, en vez de posteriormente. En la planta con producción a gran escala, sin embargo, lo que prevalece es el precio de la electricidad, e interesará disminuir el consumo de esta lo máximo posible.

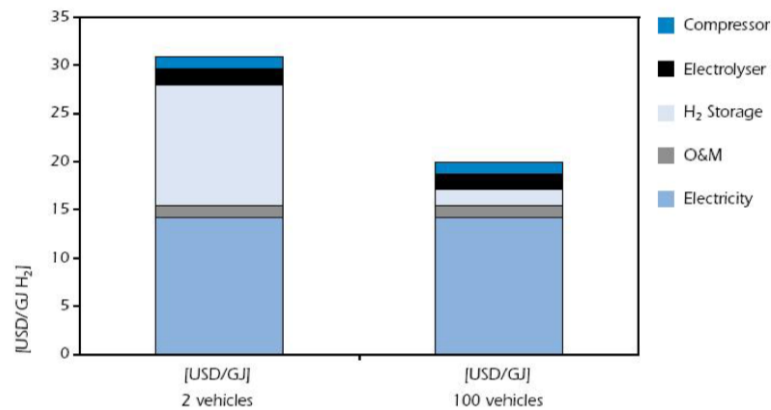
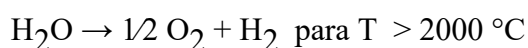


Figura 9. Estructura de costes de producción de hidrógeno por electrólisis para estación de llenado doméstico (2 vehículos/día) y de gran escala (100 vehículos/día)

2.4.2.2 Termólisis

La termólisis, en general, es la extracción del hidrógeno de la molécula que lo contiene (agua o hidrocarburo) a través de la aplicación de calor, con la diferencia respecto a los casos anteriores de la procedencia en la fuente de calor. Se considerará como proceso químico cuando la fuente de calor provenga de la combustión, y como termolítico cuando provenga de una fuente externa, cómo la energía solar o la nuclear. Los procesos de reformado, pirólisis, y de gasificación, por lo tanto, se podrían considerar como termolíticos si la fuente de calor proviniese de una fuente externa, y no de la quema de un combustible (que suele ser el mismo del que se extrae el hidrógeno, como el metano, la biomasa, el carbón, etc).

En principal inconveniente de la termólisis del agua es la alta temperatura que se requiere para llevarla a cabo. Alrededor de 2500 K son necesarios para que la energía térmica, que se convierte en energía vibracional en la molécula, sea la suficiente para separarla. Estos procesos, por lo tanto, se llevan a cabo en hornos solares con instalaciones muy costosas y complejas, reduciendo su rendimiento, por lo que no son muy comunes, La estequiometría de la reacción se puede ver a continuación.



2.4.3 Otros procesos

2.4.3.1 Gasificación

La diferencia entre la pirolisis y la gasificación es que en esta última se utiliza una reducida cantidad de agente oxidante (aire, oxígeno o agua). Como resultado del proceso se obtiene gas (CO , CO_2 , H_2 y CH_4) y residuo sólido (coque). El porcentaje de oxígeno estequiométrico oscila entre un 10 y 50%, y la temperatura entre 1000 $^\circ\text{C}$ y 1500 $^\circ\text{C}$ (que se consigue por la condición exotérmica de este proceso). La gasificación permite aumentar la obtención de gases respecto al proceso pirolítico, y de mayor pureza en

algunos casos. Si el agente oxidante es aire, se obtiene lo que se denomina “gas pobre”, que tiene un alto contenido en nitrógeno y óxido de carbono. Sin embargo, si se emplea oxígeno puro, se obtiene un gas que puede estar compuesto únicamente por hidrógeno y monóxido de carbono, permitiendo aumentar el porcentaje de hidrógeno final. Aunque no existen estequiometrías exactas para representar los procesos de gasificación, a continuación, se ilustra la estequiometría más simple de la gasificación del carbón. Actualmente, este se trata del segundo proceso más común en la producción de hidrógeno, pudiéndose aplicar a otra materia como la biomasa.



2.5 Clasificación ambiental

El presente apartado pretende explicar la actual clasificación del hidrógeno en función del impacto ambiental de su generación. Aunque existen diversas variantes dependiendo de la procedencia de la generación y el nivel de captura de las emisiones, los tres principales tipos son: hidrógeno gris, azul y verde.

Aunque actualmente los costes asociados a la producción del hidrógeno gris sean los más bajos, puede que aumenten en los próximos años debido a las sanciones y restricciones referentes a las emisiones. Primero se equipará en precio al proceso con captura de emisiones, y probablemente en un futuro al de la electrólisis. El hidrógeno azul es aquel que, aún proviniendo de fuentes fósiles, ha seguido un proceso de captura del dióxido de carbono (el cual deberá de ser en un periodo de tiempo mayor a 100 años, y un porcentaje mínimo del total de CO₂ emitido del 60%). Además, estas cantidades de CO₂ pueden ser empleadas para fabricar eco combustibles. Teniendo en cuenta este porcentaje, y que una planta de reformado genera 11 kg de CO₂ por kg de H₂, las emisiones de CO₂ de una planta de reformado para clasificar el hidrógeno producido en ella como azul, no puede ser mayor de $0,6 \cdot 11 \text{ kg CO}_2/\text{kgH}_2 = 4,37 \text{ CO}_2/\text{kgH}_2$.

Por último, el hidrógeno verde es aquel en el cuál la energía o materia prima empleadas en el proceso provienen de fuentes renovables, y en su generación se emiten menos de 4,37 CO₂/kgH₂. Por ejemplo, aunque se generen emisiones, se considera hidrógeno verde el producido mediante el reformado del biogás o de compuestos orgánicos, o la gasificación de biomasa forestal o residuos orgánicos, pues se consideran fuentes renovables.

De todos modos, el principal proceso de generación de hidrógeno verde es la electrólisis del agua empleando electricidad renovable, teniendo un gran potencial las plantas de generación renovable que dispongan del agua necesaria. La producción de hidrógeno en estas plantas se podría emplear como un método de almacenamiento de los excedentes de electricidad producidos. En concreto, en las centrales eólicas y solares, en donde la generación es más impredecible e incontrolable, en días de excedentes de generación, esta se podría almacenar a gran escala produciendo hidrógeno. Más adelante, mediante una pila de combustible, y siguiendo el mismo proceso que en los vehículos (electrólisis inversa), el hidrógeno podría emplearse para generar electricidad, como se comentará más adelante. Esto es lo que se denomina como vector energético, es decir, una sustancia o dispositivo que permite almacenar energía, pudiendo liberarla cuando fuese necesario.

Por supuesto, el hidrógeno producido en otros procesos como la gasificación, la pirolisis, u otros, también se incluyen en esta clasificación, obteniendo un sufijo u otro en función de la cantidad de CO₂ emitido y de la procedencia de las fuentes o materia prima empleadas. En la Figura 10 se muestran las distintas posibilidades de producción de hidrógeno azul y verde.

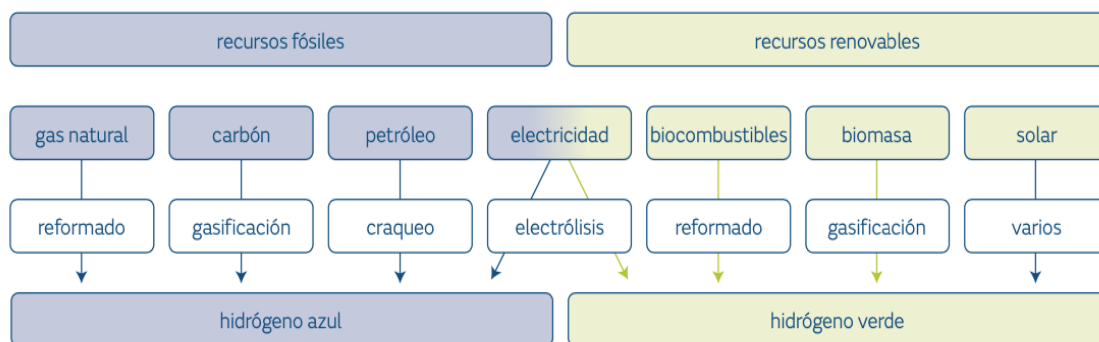
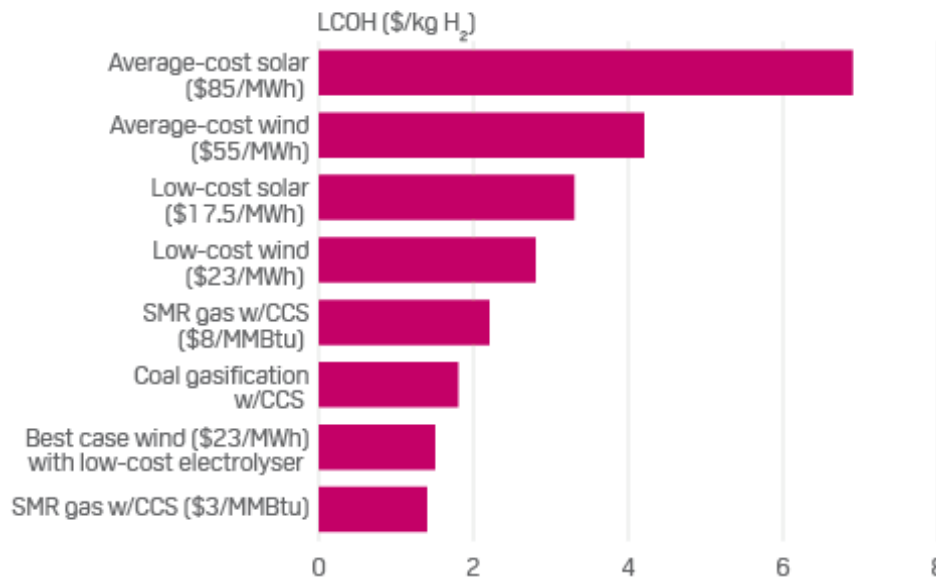


Figura 10. Rutas de producción de hidrógeno potencialmente bajo en emisiones en función de la procedencia del recurso [11]

En la Figura 11 se puede observar el actual escenario de costes de las diferentes posibilidades de producción. Se observa como, hoy en día, los costes asociados a los procesos electrolíticos son lo más elevados, yendo desde 7 \$/kg de H₂ si la electricidad procede de paneles solares, a 4,5 \$/kg de H₂ si procede de la eólica. Además, se puede ver una importante diferencia de precio entre los procesos de reformado sin captura y con ella, que tienen costes unitarios de 1,5 \$/kg de H₂ y 2,1 \$/kg de H₂ respectivamente. Sin embargo, en los días en los que el precio de la electricidad es más bajo de lo normal (representado como “low-cost wind/solar” o “best case wind”), se observa como el coste unitario de producción por electrólisis se equipara al de los procesos de reformado. Es decir, como se verá en el apartado 6.1, la reducción del precio de la electricidad podrá ser uno de los principales impulsores para lograr la paridad de precios entre la electrólisis y los métodos más contaminantes. De hecho, en la Figura 9 ya se vio como, en una planta de producción a gran escala, el coste de la electricidad es el principal contribuyente al coste unitario de los procesos de electrólisis.

HYDROGEN PRODUCTION COSTS TODAY



Note: Electrolyser capex \$840/kW except low-cost electrolyser wind at (\$200/kW), load factor equals ref scenario 48% for wind, 26% for solar.

Source: IRENA

Figura 11. Costes de producción de hidrógeno según la alternativa empleada y la procedencia de la energía [28]

3 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

Actualmente, el hidrógeno se emplea para una gran cantidad de aplicaciones. Desde la industria metálica o química, hasta más recientemente la movilidad, este compuesto ha tendido un papel importante en diferentes actividades. La Figura 12 pretende mostrar los diferentes sectores en los que se usa el hidrógeno en la actualidad. Las nuevas aplicaciones son las pilas de combustibles (movilidad) o la utilización directa como combustible en la generación de calor.

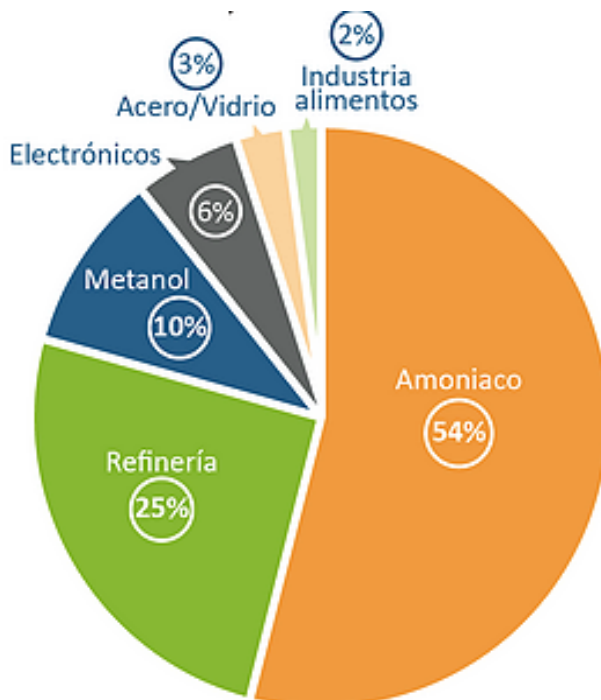


Figura 12. Usos del hidrógeno en la actualidad [29]

3.1 Aplicaciones convencionales: materia prima

Entre varias utilidades, el principal uso del hidrógeno en las refinerías es el de “limpiar” los elementos nocivos para el medio ambiente (azufre, nitrógeno o metales) de los hidrocarburos. En la combustión de estos, el azufre contenido se combinaría con el hidrógeno formando H_2S , conocido también como lluvia ácida, que se trata de uno de los fenómenos más nocivos para el medio ambiente. Mediante la hidrodesulfuración, el H_2

forma H_2S (sulfuro de hidrógeno), para alimentar a un proceso (Claus), en el que se divide el compuesto en azufre elemental (S) y hidrógeno (H_2). Aunque las restricciones de las emisiones impuestas a los vehículos de combustión y la creciente venta de estos en los últimos años han propiciado un aumento de demanda de hidrógeno en este sector, en cuanto los vehículos eléctricos consigan una mayor cuota de mercado, esta tendencia acabará extinguiéndose.

La síntesis del amoníaco (NH_3) es la aplicación más común del hidrógeno. Este se emplea principalmente para formar compuestos que constituyen los fertilizantes. Además, este compuesto también cumple una función protectora del medio ambiente: de la misma manera que el hidrógeno en las refinerías, el amoníaco se utiliza para eliminar los NO_x de los gases de combustión. Este se sintetiza empleando nitrógeno presente en el aire e hidrógeno, a través de un catalizador.

Otras de las aplicaciones son la síntesis de metanol, que se trata de un alcohol típicamente usado como anticongelante o disolvente, o en parte de procesos industriales. Así mismo, en la metalurgia, el hidrógeno es empleado como agente reductor, ayudando a obtener acero a partir del mineral de hierro (una estequiometría posible, por ejemplo, podría ser: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}$). Además, el hidrógeno también es empleado para formar diversos productos químicos y polímeros. Por último, también es comúnmente empleado para sintetizar combustibles sintéticos, que, aunque requieren menos espacio que el hidrógeno, pero más que los combustibles convencionales, tienen menos emisiones que de CO_2 que estos últimos. Debido a esta ventaja, podrían ser empleados para electrificar medios de transporte con menores facilidades para electrificarse, como el aéreo o marítimo (debido a sus largas distancias).

3.2 Nuevas aplicaciones

3.2.1 Generación de calor

Respecto a la generación de calor en el sector doméstico, destacan los equipos de cogeneración de electricidad y calor. Estas instalaciones cuentan con un reformador de vapor de agua, una caldera, y una pila o celda de combustible. El reformador de vapor de agua se encarga de producir hidrógeno, empleando como materia prima el gas natural, mientras que la celda de combustible convierte este hidrógeno en electricidad en contacto con aire, de la misma manera que en un vehículo de pila de combustible. No sólo reformar el metano para obtener hidrógeno que quemarlo directamente para generar calor es más eficiente, sino que produce menos emisiones (que además se pueden capturar). En la celda de combustible, el H_2 reacciona con O_2 formando únicamente agua, electricidad, y calor residual (que, a su vez, es reconducido a un sistema de calentamiento de agua). Cuando el hidrógeno esté establecido a gran escala, podría sustituir como materia prima al gas natural, prescindiendo así del reformador. La principal desventaja de esta tecnología es su elevado coste (debido a los costosos elementos del reformado y la celda). El precio se encuentra en torno a 3000\$/kW, y las instalaciones domésticas suelen ser de 2,5 kW.

La Figura 13 trata de ilustrar el funcionamiento de este tipo de sistemas. En esta configuración en concreto, parte del gas se quema para generar calor, pero hay otras instalaciones en las que el calor residual generado en la celda de combustibles es suficiente para cubrir las necesidades térmicas del domicilio (también podrá haber momentos en los que este calor residual sea suficiente en la configuración de la Figura 13).

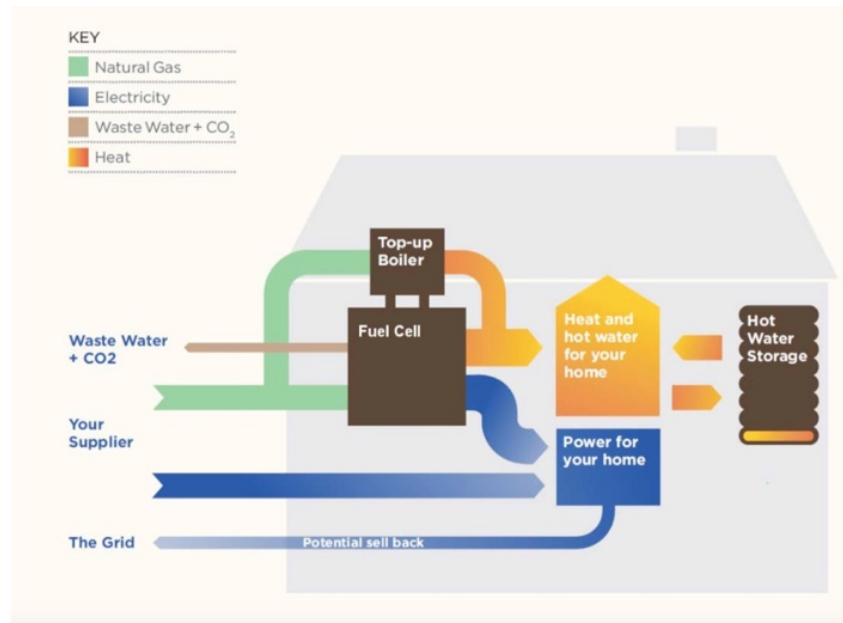


Figura 13. Funcionamiento de un sistema de cogeneración doméstico, en el que se emplea gas natural como materia prima

Sin embargo, la descarbonización del sector transporte, doméstico, o la generación de electricidad (aunque tengan un porcentaje elevado sobre el total de emisiones en el planeta), no son suficientes. También es necesario descarbonizar otros sectores, como el industrial, cuyas emisiones representan el 32% de las totales, como se puede ver en la Figura 14. De este porcentaje, alrededor de un 10% es referido a la generación de calor para poder llevar a cabo estos procesos, y se consigue generalmente mediante la combustión de combustibles fósiles (65% carbón, 20% gas natural, y 10% petróleo).

Mientras que el porcentaje restante se reparte entre la combustión de biomásas y la utilización de resistencias eléctricas (métodos menos contaminantes), su capacidad para aportar temperaturas muy elevadas es menor que la de los otros combustibles. Por lo tanto, el hidrógeno se presenta como una alternativa ideal para descarbonizar los procesos de generación de calor asociada en la industria. La combustión de hidrógeno no produce emisiones, y alcanza la temperatura necesaria para aquellas industrias que así la requieran (como se vio en la Tabla 2). Los únicos inconvenientes serían la elección de

materiales que soporten el efecto corrosivo del hidrógeno, y que permitan controlar la aportación de aire (debido a la rápida reacción de combustión de H_2).

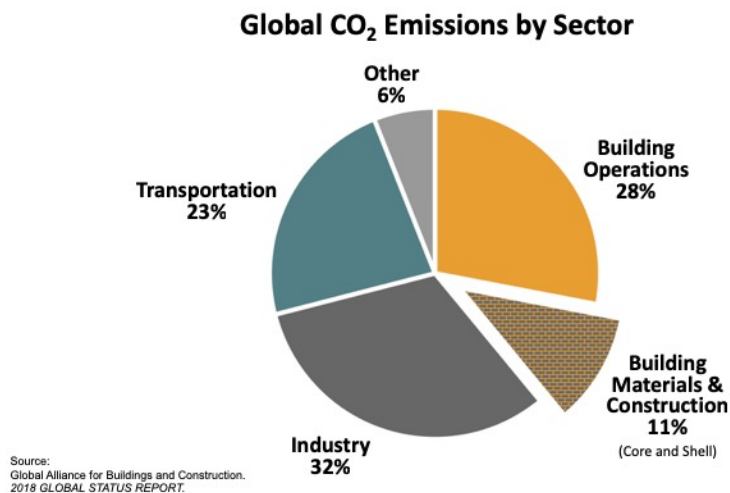


Figura 14. Porcentaje de emisiones globales de efecto invernadero por sectores [30]

3.2.2 Sector transporte

El sector transporte es una de las últimas aplicaciones en las que se ha introducido el hidrógeno, debido a que los medios de transporte que lo usan como combustible no contaminan en su utilización. Ya sea mediante la combustión directa del combustible, o a través de una celda de hidrógeno, se prevé que esta tecnología adquirirá una mayor cuota de mercado en los últimos años. Cuando los métodos de almacenamiento y producción de hidrógeno verde se abaraten, es probable que en el sector transportes empiece a incluir esta tecnología a gran escala como método de propulsión. En los siguientes apartados se pretende explicar el posible funcionamiento del hidrógeno en cada medio de transporte y sus ventajas.

3.2.2.1 Transporte marítimo y fluvial

Aunque todavía haya pocas embarcaciones que usen esta tecnología, este sector se presenta como uno de los principales candidatos a evolucionar hacia métodos que empleen hidrógeno. A día de hoy, el hidrógeno ha sido probado para impulsar embarcaciones de mediano y pequeño tamaño, que requieren una ingesta de energía menor que las de mayor tamaño. El gran consumo de combustible que necesitan requeriría, por motivos volumétricos, licuar el hidrógeno, que como se ha visto requiere de tecnologías más complejas, caras, y en fase de desarrollo. Como alternativa, en las grandes embarcaciones se ha propuesto su uso como apoyo al combustible principal, reduciendo las emisiones totales, y no requiriendo la criogenización del H_2 .

Además, los puertos y aeropuertos son puntos estratégicos para la correcta inclusión del hidrógeno en estos métodos de transporte. En ellos, la participación de empresas relacionadas con el ámbito energético suele ser alta, y suelen tener una cierta influencia pública. También son grandes centros logísticos con nuevas tecnologías desarrolladas, proyectos de innovación, y personal especializado. En ambos lugares, existen además cantidad de máquinas (grúas, remolcadores o vehículos) que consumen grandes cantidades de energía para su funcionamiento, que hasta día de hoy provenían de combustibles fósiles o empleaban tecnologías híbridas.

3.2.2.2 Transporte aéreo

El principal desafío que tiene el transporte aéreo en la correcta inclusión del hidrógeno reside en su almacenamiento. Las elevadas ingestas energéticas de los aviones requerirían de volúmenes para almacenar el H_2 inasumibles por estos medios de transporte.

A continuación, se realiza un breve cálculo para ilustrar el requerimiento volumétrico en un vuelo de media duración (Madrid – Londres). Para el cálculo del volumen, se ha considerado una reserva adicional de combustible del 30%, que es el

mínimo exigido para los aviones en caso de imprevistos. Se comparará el volumen requerido en caso de emplear queroseno (combustible típico de los aviones comerciales), y en los casos para hidrógeno comprimido y licuado.

- **Queroseno:**

Distancia Madrid – Londres: 1200 km

Consumo medio de un avión: 1200 l/100 km

Volumen requerido: $(1200 \text{ km} \cdot 1200 \text{ l}/100\text{km}) \cdot 1,3 = 18,720 \text{ l} = 18,72 \text{ m}^3$

Para los cálculos del volumen requerido para un avión que emplee hidrógeno como combustible, se consideran los siguientes factores:

- Eficiencia pila de combustible: 50 %
- Eficiencia del motor de combustión en aviones: 30%
- Densidad energética volumétrica del queroseno: 35 MJ/l
- Densidad energética volumétrica del hidrógeno a 350 bares: 2,9 MJ/l
- Densidad energética volumétrica del hidrógeno a 700 bares: 4,8 MJ/l
- Densidad energética volumétrica del hidrógeno licuado a T_0 : 8,4 MJ/l

- **Hidrógeno a 350 bares:**

Volumen requerido = $(0,3/0,5) \cdot (35/2,9) \cdot 18,72 \text{ m}^3 = 135,6 \text{ m}^3$

Volumen requerido respecto al caso con queroseno: 7,2 veces mayor

- **Hidrógeno a 700 bares:**

Volumen requerido = $(0,3/0,5) \cdot (35/4,8) \cdot 18,72 \text{ m}^3 = 82 \text{ m}^3$

Volumen requerido respecto al caso con queroseno: 4,4 veces. mayor

- **Hidrógeno licuado a T_0 :**

Volumen requerido = $(0,3/0,5) \cdot (35/8,4) \cdot 18,72 \text{ m}^3 = 46,8 \text{ m}^3$

Volumen requerido respecto al caso con queroseno: 2,5 veces mayor

Los métodos de almacenamiento de hidrógeno presurizado requieren, por lo tanto, de volúmenes que a priori dificultarían la dinámica del avión. El inconveniente del hidrógeno licuado es que se requieren temperaturas criogénicas, que se consiguen con una tecnología muy costosa. Además, el requerimiento volumétrico sigue siendo muy elevado en cualquiera de los casos en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el hidrógeno se limitaría probablemente a vuelos de corta o media duración, o como complemento de los combustibles tradicionales. Como aspecto positivo, la elevada densidad energética por unidad de masa del H_2 hace que, aun teniendo en cuenta el peso de los depósitos, se reduciría el peso total del avión respecto al caso con combustibles fósiles.

3.2.2.3 Transporte ferroviario

El sector ferroviario se caracteriza y distingue de los demás medios de transporte, en ya estar prácticamente electrificado. Mediante el uso de pantógrafos, los trenes actuales se alimentan de energía eléctrica procedente directamente de la red durante su recorrido, para alimentar los motores eléctricos o baterías que contengan. Este es, por lo tanto, un método de transporte sin emisiones en su funcionamiento directo. Sin embargo, el hidrógeno podría utilizarse como combustible para propulsar trenes de nuevas rutas, prescindiendo así de la costosa infraestructura para alimentar el pantógrafo. Así mismo, también puede servir para sustituir aquellos trenes que todavía no han sido electrificados por otros de pila de combustible. Además, los requerimientos volumétricos no son tan limitantes como en la aviación, factor que juega a su favor.

3.2.2.4 Transporte terrestre ligero

El transporte terrestre se sitúa actualmente como el principal precursor del hidrógeno en la movilidad. Los vehículos de pila de combustible podrían ser competitivos en el futuro, incluyendo tanto a vehículos ligeros como pesados. Frente a los vehículos eléctricos, por ejemplo, tienen la ventaja de tener una mayor autonomía y un menor tiempo de recarga, y frente a los vehículos de combustión, una mayor eficiencia y respeto

al medio ambiente. A continuación, se analizará el potencial del hidrógeno en los transportes terrestres ligeros y pesados.

No sería práctico hablar de descarbonización del sector transporte sin centrarse en los vehículos privados, cuyas emisiones representan el 50% del total. Aunque actualmente el precio de los vehículos de pila de combustible no es competitivo respecto a los vehículos de combustión interna o los eléctricos, se estima que en los próximos años este disminuirá significativamente. Varios factores ayudarán a ello, como se verá en el capítulo 6.2 (mayor demanda, producción a escala, reducción del precio de los componentes, etc...). Debido a la escasez de compradores de estos vehículos, la tasa de fabricación de ellos es baja, lo que conlleva unos mayores costes unitarios. Cuando estos procesos de fabricación se masifiquen, como en casi cualquier industria, los precios unitarios se reducirán paulatinamente. Actualmente hay pocos modelos de coches de pila de combustible en el mercado, entre los que destacan el Honda Clarity, el Hyundai Nexo, y el Toyota Mirai [1].

Aunque la autonomía de estos vehículos podría ser un factor determinante favorable a la compra de ellos, la distancia media recorrida por los vehículos ligeros diariamente, en realidad, revela que el requerimiento de autonomía no es tan elevado. La Figura 15 pretende ilustrar el porcentaje de vehículos privados que recorren cierta distancia cada día (de media en Europa). En ella se puede deducir como la mayoría de ellos recorren distancias inferiores a los 100 km diarios. Para aquellos vehículos privados que recorren mayores distancias, la alternativa de hidrógeno sí podría ser óptima en un futuro con una mayor infraestructura de carga y menores precios del hidrógeno y del vehículo en el país.

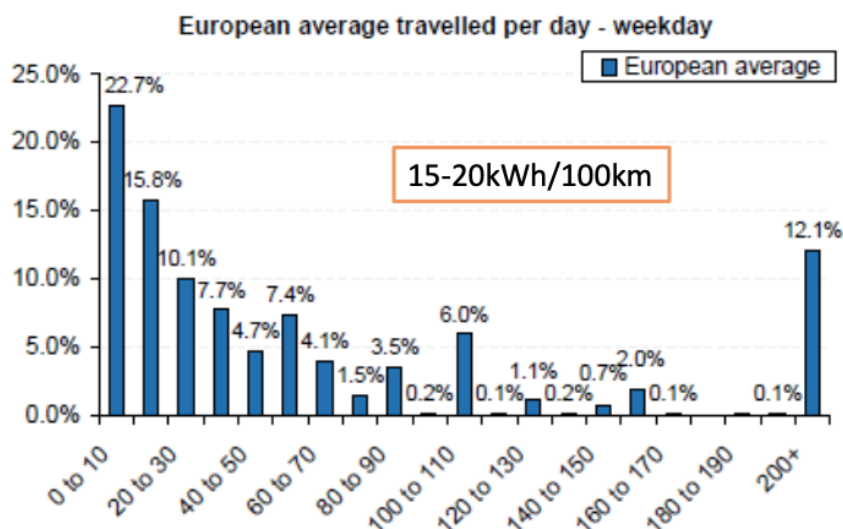


Figura 15. Distancia media diaria recorrida por los vehículos particulares en Europa [10]

Además, otro de los inconvenientes actuales es la escasa infraestructura de puntos de carga. Aunque en zonas como California se está desarrollando un proyecto de construcción masiva de nuevos puntos de carga (además de los 50 ya existentes), la mayoría de los países todavía están en fase de planteamiento de estas iniciativas. Estos vehículos se encuentran sobre todo en países como Alemania, Japón, Corea, o Estados Unidos (en concreto California, estado donde circulan la mitad de los vehículos de este tipo del mundo). En este último estado americano, además, se están llevando a cabo continuos proyectos para descarbonizar el transporte público, y en concreto facilitar la transición hacia autobuses propulsados por hidrógeno, como se verá en el siguiente apartado [11], [1].

Por último, otro factor que juega en contra del hidrógeno como combustible, es su elevado precio. Actualmente el precio de repostaje de un vehículo de pila de combustible, para garantizar una cierta distancia, puede ser el doble y hasta el triple o cuádruple del precio de repostaje de los vehículos de combustión interna y eléctricos respectivamente. En el capítulo 6.1 se verá como el precio del hidrógeno disminuirá con los años [1].

3.2.2.5 Transporte terrestre pesado

En el campo de los vehículos de uso intensivo (que en su gran mayoría se tratan de vehículos pesados como camiones o autobuses), el hidrógeno tiene ventaja frente a las baterías eléctricas. Esto se debe a la mayor autonomía y menor tiempo de recarga de los vehículos de pila de combustible, que constituyen aspectos fundamentales en la actividad de este tipo de vehículos. Mientras que el vehículo terrestre ligero emitía el 50% de las emisiones totales del sector transportes, el transporte terrestre pesado es responsable del 25% de estas. Por lo tanto, su descarbonización también se presenta esencial para lograr una correcta transición hacia una sociedad menos contaminante [11].

Aquellos vehículos que operan en un circuito cerrado como lo autobuses urbanos, los camiones transportistas, los camiones de recogida de residuos o los autobuses de largas distancias, se presentan favorables a ser impulsados por hidrógeno en un futuro. El principal factor a considerar es la autonomía. Si a la mayor duración de recarga de una batería eléctrica se le añade la necesidad de recargarla cada 3 horas de trayecto, los vehículos eléctricos no serían óptimos para este tipo de actividades. Mientras que algunos vehículos ligeros sí podrían evolucionar hacia métodos puramente eléctricos (debido a que no requieren tanta autonomía), los vehículos pesados, en general, no cumplen la misma premisa [11].

Volviendo al campo de los vehículos pesados, en los últimos años varios proyectos están siendo llevados a cabo por algunas naciones. Estos se encuentran bajo el marco del proyecto “JIVE” financiado por la Unión Europea, que pretende impulsar el reemplazo de vehículos de combustible mediante la implantación de autobuses urbanos de uso público y propulsados por hidrógeno. Para ello, también se está desarrollando la infraestructura de recarga necesaria para la correcta puesta en escena del proyecto. La Figura 16 pretende ilustrar las intenciones de algunos países como Reino Unido, Alemania o Italia [11].

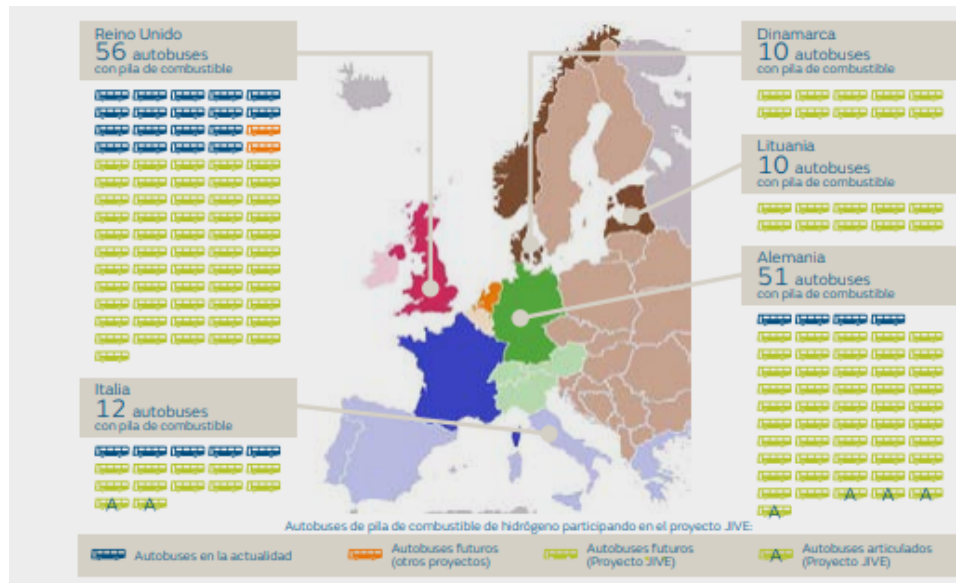


Figura 16. Despliegue de autobuses de hidrógeno en Europa, bajo el marco del proyecto JIVE [11]

4 TIPOS DE VEHÍCULOS

El presente capítulo pretende explicar el funcionamiento y las características principales de los diferentes tipos de vehículos que se pueden encontrar hoy en día en el mercado (prestando especial atención a los vehículos de pila de combustible). Este servirá como introducción a la comparativa más detallada que posteriormente se llevará a cabo en el capítulo 5.

4.1 Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV)

El funcionamiento de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno se fundamenta en el uso de una celda electroquímica, que convierte el hidrógeno y oxígeno en agua y electricidad. La electricidad producida se reconduce para alimentar a un motor eléctrico, encargado de la propulsión del coche. El oxígeno empleado se obtiene de la purificación del aire, que se realiza “*in situ*” mediante un purificador a bordo del vehículo.

La celda está formada por un ánodo, un cátodo, y un electrolito. Resumidamente, para producir electricidad, se alimenta el ánodo de la celda con H_2 , y el cátodo con O_2 , que están separados por la membrana electrolítica (que suele ser de platino). El H_2 se dirige hacia el cátodo, pero la membrana electrolítica sólo permite el flujo de protones, por lo que los electrones se reconducen por un circuito (la electricidad es el flujo de electrones), alimentando así la batería eléctrica o el motor, y acabando en el cátodo a través del mismo circuito. Cuando los protones o iones del H_2 llegan al cátodo, se combinan con el O_2 formando agua y calor. Cada molécula de O_2 se divide en dos átomos de este elemento, y cada átomo se combina con dos iones de hidrógeno y dos electrones (de los que han sido reconducidos). El proceso global llevado a cabo en la celda se denomina electrólisis inversa, y su funcionamiento se ilustra en la Figura 17 [31].

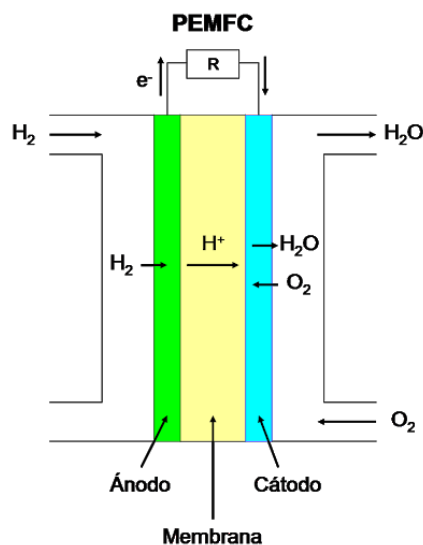


Figura 17. Funcionamiento de la electrólisis inversa en una celda electrolítica [32]

La electricidad que se genera en la celda de combustible, por lo tanto, puede seguir dos caminos en función de la demanda eléctrica del vehículo: alimentar directamente el motor eléctrico, o la batería. Esta última, además, se encarga de almacenar la energía producida en el frenado del vehículo, como sucede en todos los vehículos electrificados. Sin embargo, puesto que el requerimiento de almacenamiento es menor que en los vehículos puramente eléctricos, la capacidad de la batería no es tan grande [31]. El hidrógeno, aunque se podría almacenar también de forma licuada, se deposita generalmente de forma comprimida (a 700 bar normalmente) en tanques preparados para ello, pudiendo almacenar 5 kg, que otorgan una autonomía de 500 km.

Para obtener oxígeno lo más puro posible, estos vehículos constan de un proceso de aspirado, filtrado y compresión del aire. Estos sistemas de purificación están muy desarrollados, siendo capaces de filtrar el 99,9 % del polvo más fino (PM25). De hecho, algunos estudios indican que la inclusión masiva de estos vehículos podría ser beneficioso para el medio ambiente, no sólo en cuanto a reducción de emisiones, sino por la purificación del aire en las ciudades que los vehículos de hidrógeno podrían producir [33].

En la práctica, los vehículos de pila de combustible se pueden considerar como una tipología más de vehículo eléctrico, debido a que el funcionamiento del motor es idéntico, con la única diferencia de la procedencia de la electricidad. A continuación, se muestra una imagen ilustrativa de los diferentes elementos esenciales que intervienen en el funcionamiento de un vehículo que emplea hidrógeno como combustible.

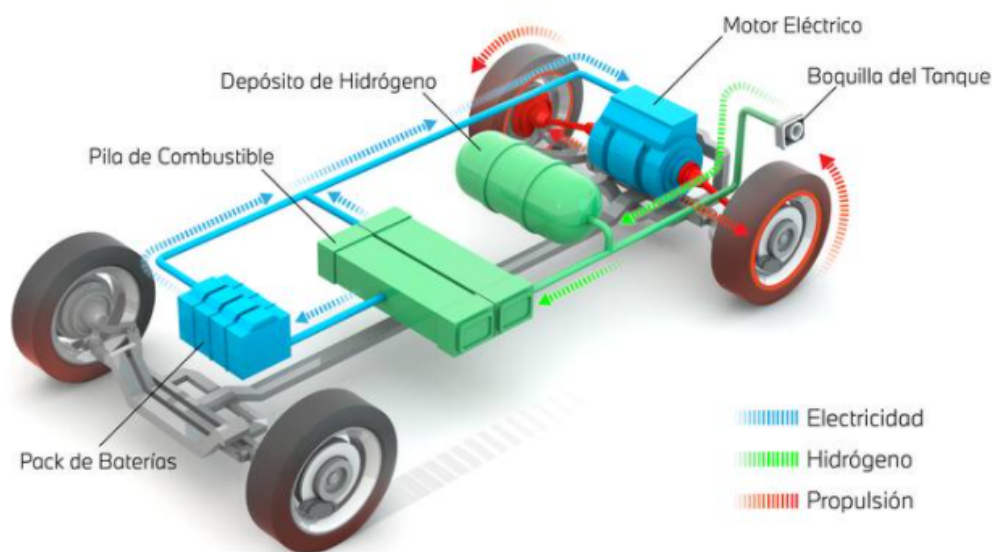


Figura 18. Diferentes elementos que participan en la propulsión de un vehículo de combustible de hidrógeno [31]

El motor eléctrico tiene las mismas características que uno empleado en un vehículo puramente eléctrico de batería. Se distinguen dos, el de corriente continua o síncrono, y el de inducción o asíncrono. El principio de funcionamiento del motor síncrono se basa en la alineación de los imanes a los campos magnéticos. Mientras que en el estator (parte fija) de la máquina circulan corrientes alternas que generan un campo magnético giratorio, el imán (o electroimán generado por corriente continua) situado en la parte móvil (rotor), tiende a alinearse con el campo magnético producido desde el estator, haciendo así girar al eje en el que está fijado, y generando así movimiento que es transferido a las ruedas. Por otro lado, en el motor asíncrono no hay un imán o electroimán en la parte móvil, sino un elemento sobre el cuál, por el fenómeno de inducción de Faraday, se inducen corrientes que se oponen a la variación del campo magnético

giratorio producido por las intensidades del estator. La interacción de los campos magnéticos del estator y del rotor es lo que da el par necesario para propulsar el eje y generar movimiento. Cabe destacar en este caso que la velocidad de giro del rotor no corresponde a la velocidad de giro del campo magnético producido por las corrientes del estator, como sí ocurría en el caso de la máquina síncrona o de corriente continua [34].

4.2 Vehículos de combustión interna (ICE)

Los vehículos de combustión interna son aquellos que obtienen la energía mecánica necesaria para propulsar el vehículo aprovechando la energía química de un combustible, mediante un proceso de combustión. Los principales inconvenientes de los motores de combustión interna son la reducida eficiencia en la conversión de energía química a energía mecánica (pues la mayoría de la energía química se convierte en calor), y las altas emisiones que producen. Aunque la mayoría de los vehículos de combustión interna emplean gasolina o diésel como combustible, en los últimos años el gas natural está empezando a coger una mayor cuota de mercado gracias a su mejor eficiencia y menores emisiones en la combustión. A continuación, se explica detalladamente el funcionamiento de cada tipología.

4.2.1 Gasolina como combustible

Los vehículos que emplean gasolina como combustible tienen una baja eficiencia energética. De la energía química total contenida en el combustible, sólo un 25% se convierte en energía mecánica, mientras que el porcentaje restante se pierde por rozamientos, transmisiones, y en forma de calor. El principio de funcionamiento se basa en el prendido del combustible, que, mediante su explosión, empuja un pistón que dentro de un cilindro se mueve de forma lineal, y se convierte en movimiento rotatorio mediante una pieza denominada como cigüeñal.

Los procesos constan de cuatro fases: admisión, compresión, explosión y escape. Aunque existen dos tipos de motores, los de cuatro tiempos y dos tiempos, los más comunes en la movilidad son los de cuatro. Las diferencias entre ambos se explican a continuación [35].

- **2 tiempos:**

- Las fases de admisión y compresión se producen a la vez, de la misma manera que las de explosión y escape.
- Sólo hay una válvula que ejerce ambas funciones de admisión de combustible y de escape de los gases de combustión.

- **4 tiempos:**

- Se producen los cuatro pasos por separado.
- Hay dos válvulas con distintas funcionalidades. En el proceso de admisión, la válvula de admisión se abre para dejar entrar el combustible, mientras el pistón baja. En la compresión, las válvulas de admisión están cerradas mientras que el pistón sube, comprimiendo la mezcla de combustible y oxígeno. En la explosión, en el caso de motor de gasolina, la bujía produce una pequeña chispa que prende la mezcla, generando una explosión que empuja el pistón hacia abajo y que genera así el movimiento. En el proceso de escape, el pistón vuelve a subir a la vez que la válvula de escape se abre para dejar escapar los gases de la combustión.
- Posteriormente se repite el ciclo completo, mientras el pistón baja, se admite de nuevo combustible con la válvula de admisión abierta. Cuando el pistón está subiendo, dicha válvula ya ha sido cerrada, se comprime la mezcla, y se continúa con el resto del proceso de la misma manera que en el caso anterior.

En la Figura 19, se muestran las partes de un motor de combustión interna que usa gasolina como combustible.

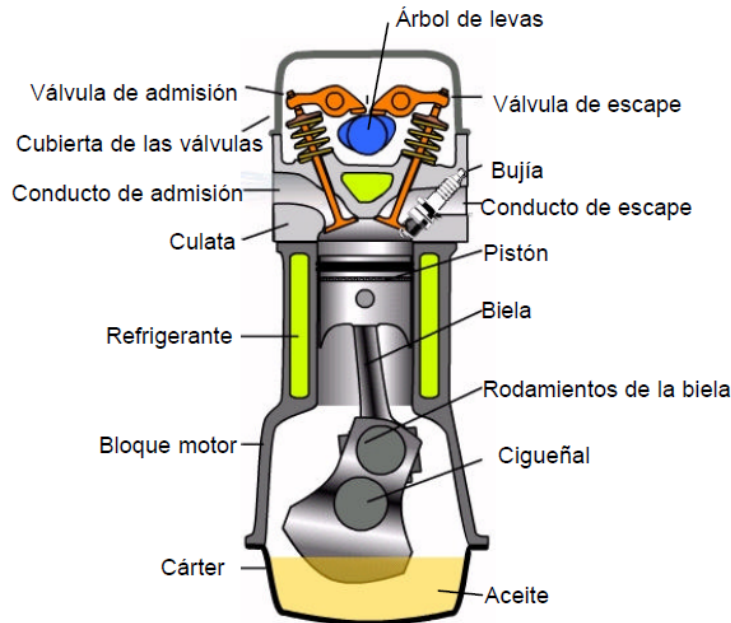


Figura 19. Partes de un motor de combustión interna de gasolina [35]

En cuanto a la contaminación, como se explicará en detalle en el apartado 5.7, los motores de gasolina emiten principalmente monóxidos y dióxidos de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos sin quemar y compuestos de plomo, además de partículas.

4.2.2 Diésel como combustible

La principal diferencia entre un proceso Diésel y Otto (el que se lleva a cabo en la combustión de la gasolina), es el método para lograr la explosión. Mientras que en los procesos Otto es necesaria una chispa para prender la mezcla de combustible y aire comprimido, en el ciclo Diésel es suficiente con comprimir el aire, sin haber inyectado el combustible todavía. Una vez el aire está comprimido, se inyecta el diésel, y se produce la combustión sin necesidad de generar una chispa, debido a la elevada temperatura del aire comprimido. Por supuesto, esto revela que la temperatura de ignición del diésel es menor que la de la gasolina, como se explicó en la Tabla 2. Es decir, mientras que al diésel le llega con alcanzar una cierta temperatura para quemarse, la gasolina requiere de una chispa para esa misma temperatura. Por lo tanto, en un motor diésel no se requiere

una bujía (elemento encargado de producir la chispa de ignición). Sin embargo, debido a la alta presión a la que se debe de comprimir el aire, se requiere que los materiales sean más robustos y grandes, y generalmente más pesados [35].

Otra de las principales diferencias entre los combustibles tiene que ver con la eficiencia del proceso de combustión. Mientras que en los motores de gasolina se pueden alcanzar, como máximo, eficiencias del 30%, algunos motores diésel de última generación ya han alcanzado eficiencias del 45%, aunque la media esté alrededor del 35% [35].

En cuanto a la contaminación de estos vehículos, la principal diferencia respecto a aquellos que emplean gasolina como combustible, es la mayor cantidad de emisiones de óxidos de nitrógeno, y la menor cantidad de óxidos de carbono. Los NO_x son moléculas muy peligrosas para el ser humano, especialmente si son emitida en las ciudades [35].

4.2.3 Gas como combustible

Los vehículos impulsados por gas tienen el mismo principio de funcionamiento que los de gasolina, requiriendo de un sistema de inyección adaptado a las características de este combustible. De hecho, en algunos vehículos se emplean ambos combustibles, de tal manera que cuando se acaba el gas se utiliza la gasolina, ofreciendo una mayor autonomía. Otras de sus ventajas son las menores emisiones, (reduciendo el nivel de contaminantes en porcentajes que se verán en los siguientes capítulos), y sus menores costes, ya que no están sometidos a tantos impuestos, y el precio del combustible es menor [36].

Así mismo, la eficiencia del motor de gas es similar a la del motor diésel, puesto que puede trabajar a mayores presiones (debido a la mayor temperatura de ignición del gas natural respecto a la gasolina, como se puede ver en la Tabla 2). Su principal desventaja es la escasa infraestructura de puntos de carga de gas natural para vehículos,

habiendo 176 puntos en toda España para GNC (gas natural comprimido), claramente insuficiente para ofrecer un servicio óptimo. De todos modos, se está logrando un importante desarrollo en este campo en los últimos años con la rápida instalación de nuevos puntos [36].

Las dos alternativas de gas natural que existen para la propulsión de vehículos se denominan bajo las siglas GNV (gas natural vehicular). Existen dos: el GNC (gas natural comprimido), y el GNL (gas natural licuado). De la misma manera que el hidrógeno, la ventaja del GNL frente al GNC es su menor requerimiento de espacio, al ser su densidad energética volumétrica mayor al ser licuado. Debido al alto requerimiento técnico que implica el almacenamiento de gas licuado, el GNL suele ser empleado como carburante para medios de transporte más grandes y pesados, como camiones, buses, o incluso barcos [36].

Otra alternativa al GNV es el GLP (gas licuado del petróleo). Las emisiones de la combustión de este combustible también son menores que la de los combustibles convencionales, y la infraestructura de recarga está más desarrollada que la del GNV. Como desventaja, el consumo de los vehículos que empleen este combustible es mayor, de la misma forma que el precio del combustible [37].

4.3 Vehículos eléctricos (EV)

Los vehículos eléctricos, en principio, constituían la principal alternativa para descarbonizar el transporte. A pesar de los grandes avances llevados a cabo su desarrollo, (y en concreto en la tecnología de las baterías), existe un inconveniente que puede limitar en gran medida el progreso de este tipo de vehículos, referente a la escasez de recursos para fabricar las baterías. Como se menciona en el resumen del trabajo, el litio es un material escaso, y las reservas calculadas podrían servir para reemplazar únicamente un 10% de la flota actual de vehículos. Las baterías que empleen otros materiales, sin embargo, podrían ser una alternativa a este problema [38].

Su principio de funcionamiento se basa en un motor eléctrico. La electricidad empleada para alimentar dicho motor, en este caso, proviene de una batería eléctrica, que deberá ser cargada cada cierto tiempo. La principal ventaja que tienen los vehículos eléctricos frente a los convencionales de combustión interna tiene que ver con las emisiones producidas. Si la electricidad producida para cargar el coche eléctrico y para el proceso de su fabricación procede de fuentes renovables, estos vehículos tendrían una huella de carbono neutra, es decir, no producirían emisiones. Por el contrario, si esta electricidad no proviene de fuentes renovables, dependiendo del origen de esta, las emisiones podrían ser importantes, y el objetivo de la descarbonización de la movilidad, en realidad, no se estaría cumpliendo. A continuación, se detallan las diferentes alternativas de vehículos con motor eléctrico [38].

4.3.1 Vehículos eléctricos de batería (BEV)

Los vehículos eléctricos enchufables, también denominados puramente eléctricos o 100 % eléctricos, son aquellos que están alimentados únicamente por baterías (que suelen ser de iones de litio). El vehículo, por lo tanto, contiene sólo una tipología de motor (eléctrico), que se alimenta exclusivamente de la electricidad procedente de la batería. La eficiencia en la conversión de la energía eléctrica en energía cinética es bastante alta, pudiendo llegar a valores de 95%. Por el contrario, la autonomía que permiten las baterías de litio de estos vehículos, el elevado tiempo de recarga que generalmente tienen, y la todavía escasa infraestructura de recarga, son algunas de las desventajas que presentan estos vehículos [38].

Una variante de los vehículos puramente eléctricos, atendiendo a la desventaja de la autonomía, son los coches eléctricos de autonomía extendida. Estos, de la misma manera que los vehículos híbridos, también cuentan con un motor de combustión a mayores del eléctrico. La diferencia respecto a estos últimos, sin embargo, es que el motor de combustión no se emplea directamente para propulsar el vehículo, sino para recargar la batería en caso de necesitarlo. La tracción del vehículo, por lo tanto, es completamente

eléctrica, y el pequeño motor de combustión permite cargar la batería en caso de ser necesario, ofreciendo un añadido en la autonomía añadido, que en todo caso no suele ser muy elevado [38].

4.3.2 Vehículos híbridos no enchufables (HEV)

Para algunos expertos, los vehículos híbridos no enchufables no deberían de ser considerados como una variante más de vehículo eléctrico, sino como una tipología de vehículo de combustión interna. El motivo de ello es que el motor eléctrico sólo es capaz funcionar por sí solo a velocidades muy bajas, y en la práctica sólo sirve como apoyo a la aceleración. Estos vehículos cuentan con un motor principal de combustión interna y otro eléctrico alimentado por una batería, que se recarga únicamente mediante la energía almacenada durante el frenado regenerativo del vehículo, es decir, no se puede recargar conectándose a la red. La autonomía típica media del motor eléctrico de estos vehículos es de 2 km [38].

4.3.3 Vehículos híbridos enchufables (PHEV)

A diferencia de los híbridos no enchufables, los PHEV pueden recarga la batería conectándola a la red. En conducción en ciudad, por ejemplo, teniendo en cuenta los múltiples frenados regenerativos que se producen en este caso, y la mayor autonomía que tienen estos vehículos, se podría conducir el coche empleando únicamente el motor eléctrico, y por ende no generando ninguna emisión. La batería, en este caso, ofrece una capacidad mucho mayor, pudiendo ofrecer autonomías (empleando únicamente el motor eléctrico), de 60 km de media, dependiendo principalmente del tipo de conducción (urbana o carretera). En la Figura 20, se muestran las diferentes alternativas de vehículos eléctricos. Se podría añadir a ella la Figura 18, que ilustra esquemáticamente las principales partes de un vehículo eléctrico de pila de combustible de hidrógeno [38].

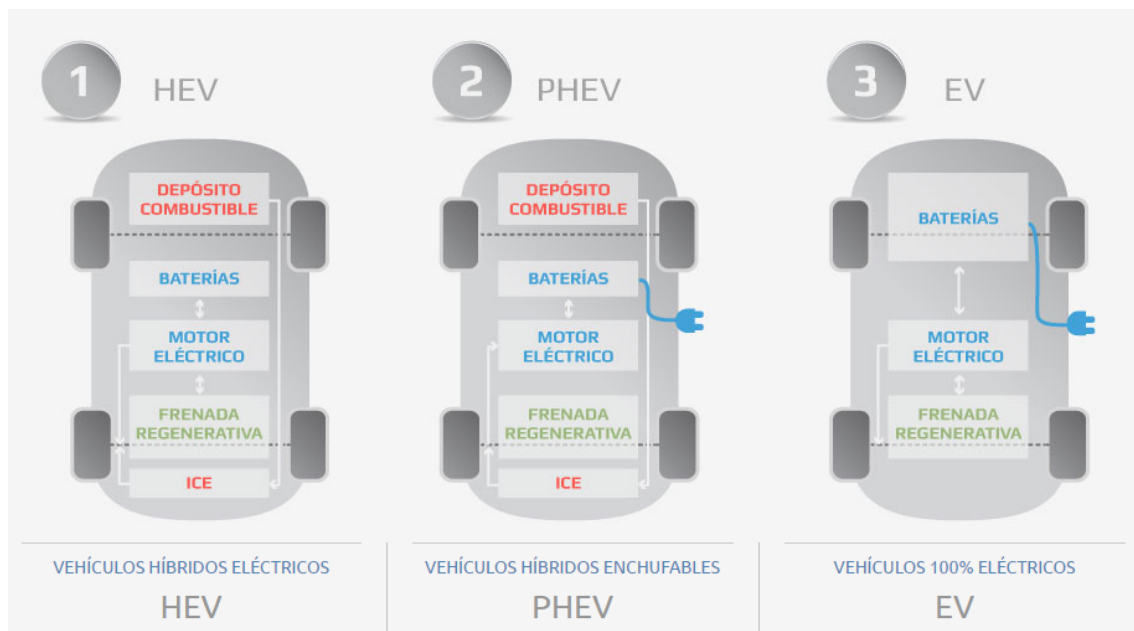


Figura 20. Principales partes de las diferentes tipologías de vehículos eléctricos, sin tener en cuenta los de pila de combustible [39]

5 COMPARATIVA ENTRE TIPOS DE VEHÍCULOS

A continuación, se compararán las características principales de los tipos de vehículos introducidos anteriormente. Este capítulo servirá para establecer el marco teórico necesario para realizar la siguiente sección, que evaluará el potencial de implantación de los vehículos de hidrógeno en el mercado. Se analizarán cuestiones económicas (precio del vehículo y del combustible), ambientales (emisiones), y técnicas (eficiencia, autonomía, etc...). Además, no sólo se tendrán en cuenta estas características en la actualidad, sino que se tratará de estimar como evolucionarán algunas de ellas en los próximos años.

5.1 Autonomía

La autonomía, junto al tiempo de recarga, se presenta como la principal ventaja de los vehículos de pila de combustible frente a los puramente eléctricos. A pesar de ya existir EVs con autonomías muy competitivas (llegando a los 650 km en algunos casos), de momento suelen ser alternativas excesivamente caras y poco accesibles al consumidor medio. Múltiples estudios invitan a pensar que las autonomías de los vehículos eléctricos aumentarán en los próximos años. Sin embargo, para que los coches de gama baja puedan tener estas características, pero hace falta tiempo para que las autonomías de los EVs de gama baja puedan equipararse a las de sus análogos de combustión interna.

Para determinar la autonomía teórica actual de los vehículos de pila de combustible, es necesario analizar los pocos modelos que se comercializan en el mercado actualmente. En la Tabla 9 se muestran las autonomías actuales homologadas de dichos modelos.

	Toyota Mirai	Hyundai Nexi	Honda Clarity
Autonomía (km)	650	666	579

Tabla 9. Autonomía de los 3 modelos principales de vehículos de hidrógeno en la actualidad [40]

En cuanto a los vehículos puramente eléctricos, aunque los modelos antiguos no tengan una elevada autonomía, los últimos avances están permitiendo sacar al mercado vehículos con autonomías teóricas medias de 400 km, y máximas de incluso 650 km. En Figura 21 se puede observar la tendencia creciente de la autonomía teórica de los nuevos modelos de vehículos 100 % eléctricos sacados al mercado en EEUU en los últimos 10 años. Como la magnitud de distancia empleada en dicha figura es la milla, los valores del eje vertical deben ser multiplicados por un factor de 1,61 (aproximadamente) para pasarlos a kilómetros. Por lo tanto, según la gráfica, la autonomía teórica media de los vehículos puramente eléctricos lanzados al mercado en EEUU en el año 2020 es de $260 \cdot 1,61 = 420$ km, y la máxima de $400 \cdot 1,61 = 650$ km, como se indicó anteriormente.

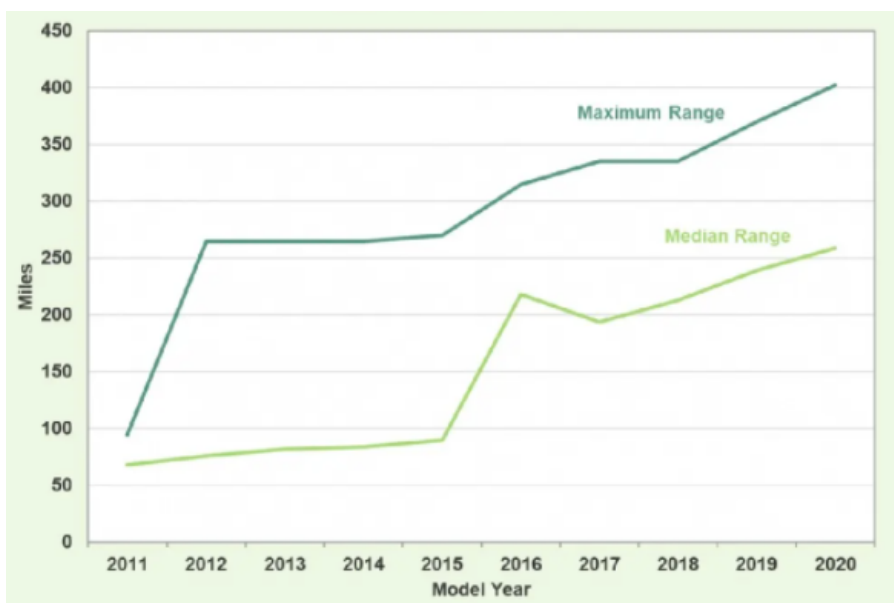


Figura 21. Autonomía media y máxima de los nuevos modelos de coches eléctricos a la venta en EE. UU desde 2011 [41]

Sin embargo, estas autonomías están referidas a los últimos modelos sacados al mercado. Si se tienen en cuenta todos los EVs de la flota automovilística, se obtiene una autonomía teórica media de 320 km. Pero, además, la autonomía real es inferior a la teórica (tanto para BEV como para otros tipos de vehículos), reduciéndose de media en un factor del 10%, por lo que la autonomía real media de los coches puramente eléctricos

sería, en realidad, de $320 \cdot 0,9 = 290$ km. Algunos de los factores por los que la autonomía real no es igual a la teórica son las temperaturas (mayor de 20 °C o menor de 10°C afecta al funcionamiento del motor eléctrico), las altas velocidades, o la cantidad de pasajeros. Es verdaderamente relevante, además, el tipo de conducción que esté llevando el vehículo. Mientras que los vehículos de combustión interna consumen más cuando el coche circula por ciudad que por carretera, en los vehículos eléctricos sucede lo contrario. Los múltiples frenados que se realizan en la ciudad ayudan a aumentar la autonomía de los coches eléctricos, puesto que, mediante el sistema de frenado regenerativo, se recarga la batería del vehículo. Por lo tanto, la autonomía máxima indicada por los comercializadores suele estar referida a la conducción del vehículo en la ciudad, y por ello es necesario aplicar el factor de corrección.

Con todo ello, se podría estimar la autonomía que los vehículos puramente eléctricos tendrán en los próximos años. Como hipótesis para la predicción, se considerará que la última pendiente de la Figura 21 (del año 2017 al 2020) se mantendrá constante en los próximos años. Para calcular dicha pendiente, se mide el incremento de autonomía de los vehículos en el año 2020 y 2019, y se divide entre el intervalo de tiempo, en este caso de un año. Cabe destacar que la pendiente en los últimos cuatro años (es decir, en el 2017, 2018, 2019 y 2020) se ha mantenido constante, y por eso se realiza el cálculo solamente utilizando el último año de la gráfica.

Además, hay que añadir un factor de corrección que refleje la realidad en cuanto a la totalidad de vehículos 100 % eléctricos en la flota se refiere, y en cuanto a la autonomía real frente a la teórica. Es decir, como se comentó anteriormente, no todos los coches que del parque automovilístico tienen la misma autonomía que los modelos recién sacados al mercado, y la autonomía teórica especificada es mayor a la real. Dicho factor se calcula dividiendo la autonomía media real de la flota entre la autonomía media teórica de los últimos modelos en el último año, esto es: $290/420$. Por último, para calcularlo en km/año, es necesario que multiplicar por el factor de corrección que pasa las millas a kilómetros (1,61).

$$\frac{(260 - 240) \cdot 1,61 \cdot \frac{290}{420}}{2020 - 2019} = 22 \text{ km/año}$$

Es decir, la autonomía media real de los BEVs aumenta en 22 km/año. En cuanto a la autonomía máxima, sólo sería necesario aplicarle el factor que convierte la autonomía teórica en real, puesto que esta sí viene determinada por la autonomía máxima del último modelo del mercado, y no está afectada por el resto de vehículos del parque. Por lo tanto, suponiendo que la pendiente de los últimos dos años (de 2018 a 2020) se mantiene constante, se puede estimar la autonomía máxima real de los EVs en los próximos años de la misma manera que se hizo con la autonomía media.

$$\frac{(400 - 340) \cdot 1,61 \cdot 0,9}{2020 - 2018} = 43,5 \text{ km/año}$$

Es decir, la autonomía media aumenta en 43,5 kilómetros al año. Se puede observar como la autonomía máxima aumenta más cada año que la media. Esto se debe a que la autonomía máxima no está afectada por la autonomía de los vehículos eléctricos ya existentes (de entre los cuales hay varios con autonomías verdaderamente bajas) mientras que la autonomía media sí se ve afectada.

Con estos cálculos, se puede establecer un horizonte temporal de 10 años, con el fin de estudiar la evolución de las autonomías medias y máximas reales de los BEVs en el corto y medio plazo. A efectos prácticos sólo tendrá en cuenta para la comparativa el progreso de la autonomía media, puesto que es la que afectará a la mayor parte de los consumidores y mejor refleja la realidad. A día de hoy, por ejemplo, aunque hay marcas como Tesla que ya ofrecen autonomías de 650 km, se tratan de vehículos con precios inalcanzables para la mayor parte de la sociedad. A continuación, se presenta la tabla con los cálculos realizados. Es importante recordar que se trata de una estimación bajo la hipótesis de que la tendencia de aumento de autonomía seguirá igual, lo que podría variar con los años en la realidad. Además, se calcula (atendiendo a la Figura 21), que la

autonomía máxima real actual es de $400 \cdot 1,61 \cdot 0,9 = 580$ km. Así mismo, se aproxima a la unidad más cercana para simplificar.

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Autonomía media real	312	334	356	378	400	422	444	466	488	510
Autonomía máx. real	623	667	710	754	797	841	884	923	971	1015

Tabla 10. Evolución estimada de las autonomías medias y máximas reales de los BEVs en los próximos años

La Figura 22 muestra la evolución de la autonomía de los BEVs con los años, tanto los datos históricos como los estimados. Se observa como tendrían que pasar varios años para que la autonomía media real de estos vehículos alcance la de los de combustión, cuya autonomía media es de 900 km. Sosteniendo la hipótesis de que la pendiente de ganancia de autonomía con los años se mantiene constante, tendrían que pasar 27 años para, aproximadamente, igualar esa cifra. De todos modos, los progresos que se están llevando a cabo en los últimos años están favoreciendo un mayor desarrollo anual en el progreso de la autonomía de los vehículos eléctricos, lo que probablemente podrá acortar esta cifra.

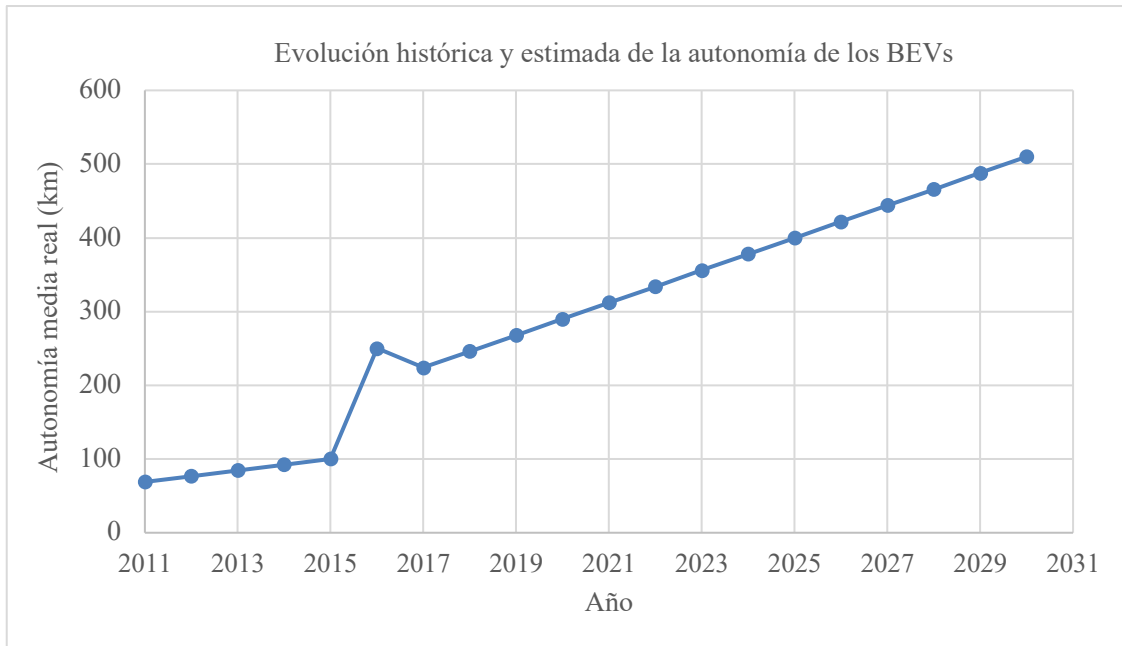


Figura 22. Evolución histórica y estimada de la autonomía media real de los BEVs con los próximos años

En cuanto a la autonomía de los vehículos híbridos no enchufables es parecida a la de los vehículos convencionales de combustión interna. Mientras que en conducción urbana el consumo de combustible, en conducción de carretera puede llegar a ser mayor que el de los vehículos convencionales de combustión (principalmente debido al peso extra que aportan el motor y la batería eléctrica). De todos modos, el depósito de combustible suele ser de las mismas dimensiones que el de un vehículo convencional, y de media, la autonomía de ambas tipologías es parecida.

En cuanto a la autonomía de los vehículos híbridos enchufables, puesto que cuentan con dos fuentes de energía (el combustible y la batería), tienen cierta ventaja respecto al resto de vehículos. Además del mismo depósito de combustible que tiene un vehículo convencional de combustión, estos coches cuentan con un propulsor adicional: el motor eléctrico. Aunque la autonomía que aporta la batería de estos vehículos no suele exceder los 50 km, es suficiente para reducir el consumo medio de combustible por kilómetro recorrido, como se podrá ver en el siguiente apartado. Además, en conducción urbana, el consumo de combustible se minimiza, y en ocasiones el vehículo podría

funcionar únicamente con el motor eléctrico, debido a la capacidad de la batería y a los múltiples frenados regenerativos.

En cuanto a los vehículos de GNV, aunque la autonomía aportada por el depósito de gas no suele ser mayor de 400 kilómetros, estos vehículos suelen contar con un depósito adicional de gasolina, que se utiliza para arranques en frío o directamente cuando no queda gas.

La autonomía de los vehículos GNC está comprendida, por lo general, entre 300 y 500 km. El almacenamiento se hace a altas presiones (entre 200 y 250 bares), y a temperatura ambiente. La autonomía de estos coches depende por lo tanto de la cantidad que llevan de gasolina. Cuanta más, mayor autonomía, pero también mayor contaminación emitirá el vehículo, puesto que la combustión de la gasolina es más contaminante que la del gas natural.

Los depósitos de GNL (gas natural licuado), a diferencia de los de GNC (gas natural comprimido), ofrecen una mayor autonomía. Esto se debe a la mayor densidad energética volumétrica que tiene el gas en este estado (corroborable en la Figura 6), que permite aportar la misma cantidad de energía en un volumen más reducido. La desventaja de esta tecnología es que el GNL se trata de un producto criogénico que se debe de mantener a -160 °C, requiriendo una instalación y almacenamiento más difícil, por lo que no se suele emplear para vehículos ligeros. Para los volúmenes de depósito de GNC habituales en los vehículos, el GNL podría ofrecer autonomías de entre 800 y 1500 km, por lo que los vehículos que usan esta alternativa suelen ser aquellos que deben de recorrer largas distancias en su actividad.

Otra alternativa de uso común es el GLP (gas licuado del petróleo). Este se trata de un gas procedente de la destilación del petróleo, y está compuesto por propano y butano, en un porcentaje de 60% y 40% respectivamente. Se almacena en estado líquido a bajas presiones (10 bar), y la autonomía que ofrecen los depósitos de GLP, al igual que

los de GNC, oscila normalmente entre 300 y 500 km, aunque es cierto que la capacidad de los depósitos de este combustible puede estar entre 35 y 160 litros. Como se puede ver en la Figura 6, la densidad energética volumétrica del propano líquido es mayor que la del metano líquido, pero también lo es la del butano líquido. Por lo tanto, para un mismo depósito, ofrecería una mayor autonomía el vehículo que emplease GLP (considerando una eficiencia en la conversión de la energía química en cinética parecida para ambos vehículos). Por lo tanto, la autonomía de los vehículos GLP es ligeramente mayor a la de los GNV.

En la Tabla 11 se presenta un resumen de las autonomías medias de los vehículos según su tipología. En ella se han excluido los vehículos de GNL puesto que son mayoritariamente empleados en el transporte pesado, por lo que no procede compararlos. De la misma manera se hará en los siguientes apartados.

	FCEV	BEV	HEV	PHEV	Gasolina	Diésel	GNC	GLP
Autonomía media	650	290	900	900	900	900	400	500

Tabla 11. Autonomías medias según el tipo de vehículo

5.2 Consumo

El consumo medio actual de los vehículos de pila de combustible se sitúa en torno a los 29 kWh/100 km de combustible de hidrógeno. Sin embargo, el consumo de materia prima (la energía eléctrica necesaria para producir el hidrógeno) es mayor teniendo en cuenta toda su cadena de producción, distribución, y transporte. Los 29 kWh hacen referencia directamente a la cantidad energética de hidrógeno consumida durante la conducción (que en términos másicos se corresponde, aproximadamente, a 0,9 kg de H₂). Sin embargo, para producir esta cantidad, hace falta una ingesta de energía eléctrica de algo menos del doble de 29 kWh. Atendiendo a la eficiencia de los procesos previos de

electrólisis, transporte y distribución (61%, como se puede ver en la Figura 23), la energía necesaria sería un $1/0,61 = 1,64$ mayor. Por lo tanto, la ingesta de energía eléctrica necesaria sería de $1,64 \cdot 29 \text{ kWh} = 48 \text{ kWh}$ para poder propulsar un vehículo de hidrógeno durante 100 km.

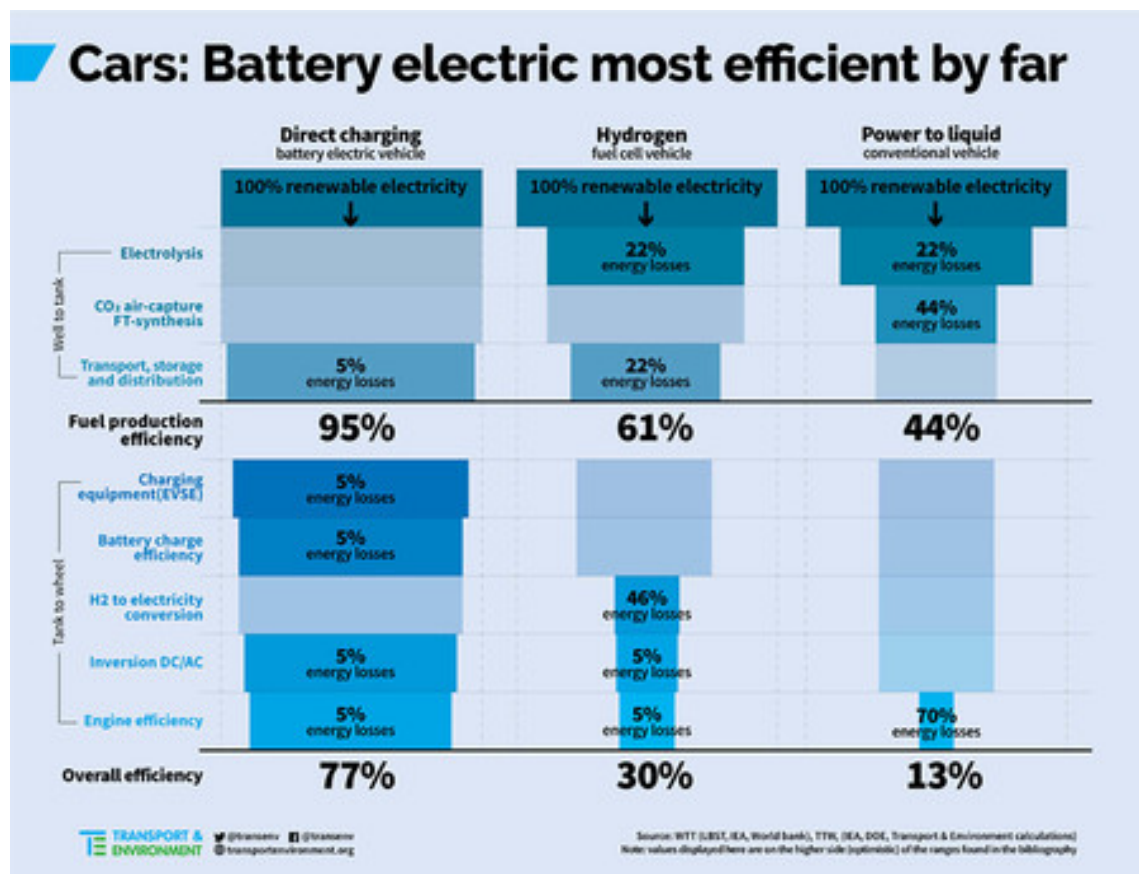


Figura 23. Comparación de la eficiencia total de los vehículos eléctricos, de pila de combustible, y de combustión, desde el excedente de energía eléctrica hasta la propulsión del vehículo [42]

Por otro lado, los vehículos eléctricos tienen un consumo medio de 17 kWh/100 km en conducción. Como la capacidad media de una batería es de 50 kWh, la autonomía teórica media, como se comentó anteriormente, se sitúa en torno a los 290 km. La eficiencia energética es una de las actuales ventajas del vehículo eléctrico respecto al de hidrógeno. Como se puede ver en la Figura 23, la eficiencia del proceso de transporte de electricidad es del 95%. Por lo tanto, la energía eléctrica necesaria generar para impulsar un BEV durante 100 km, es de $17/0,95 \approx 18 \text{ kWh}$. Mientras es necesario generar 48 kWh

de electricidad para propulsar un vehículo de hidrógeno durante 100 km, sólo 18 kWh son requeridos para propulsar un vehículo eléctrico.

Como solución, se tratan de optimizar no sólo los procesos de electrólisis y de transporte, almacenamiento y distribución, sino también los que tienen que ver con la conversión de hidrógeno en electricidad dentro de la celda (electrólisis inversa). En la Figura 23, se puede observar como, del 61% de energía en forma de hidrógeno que se obtiene tras la electrólisis y la cadena de suministro, prácticamente la mitad se pierde en lo que se conoce como electrólisis inversa (en concreto, un 46 %).

En la Figura 23 también se incluye la eficiencia que tendría un proceso mediante el cual, a partir de electricidad renovable de la red, se produjese hidrógeno y gas de síntesis, con el fin último de producir hidrocarburos mediante el proceso conocido como Fischer-Tropsch (FT en la figura, con unas pérdidas de un 44%). Posteriormente el combustible producido se emplearía para alimentar un vehículo de combustión interna. Se puede ver como esta alternativa es muy poco eficiente debido a las importantes pérdidas en los procesos de electrólisis, síntesis del carburante, y sobre todo de la combustión de este en el motor (70 %).

En cuanto a los vehículos híbridos, como en cualquier comparativa, se debe diferenciar entre los híbridos convencionales y los enchufables. Para estudiar el consumo de estos vehículos, se considerará un vehículo tipo medio, como se hará y de ha hecho hasta ahora. La capacidad media de la batería de un vehículo híbrido enchufable es de 10 kWh, permitiendo autonomías, en funcionamiento meramente eléctrico, de hasta 55 km. Sin embargo, la capacidad de las baterías de los híbridos convencionales se sitúa en torno a los 0,4 kWh, permitiendo autonomías de únicamente 2 km utilizando solamente el motor eléctrico. Esto tendrá cierta repercusión en el consumo de combustible de ambas alternativas. En cuanto al tipo de conducción, cabe destacar que, en conducción urbana, un híbrido enchufable es prácticamente capaz de funcionar solamente con el motor eléctrico, teniendo en cuenta las múltiples frenadas regenerativas que se producen en esta,

y a la capacidad de la batería eléctrica. Esto permite una reducción de consumo de combustible mayor que en el caso de híbrido no enchufable. La capacidad de la batería de estos últimos, al ser mucho menor, no permite una reducción de consumo de combustible tan elevada. Los consumos medios homologados de gasolina de los vehículos HEV y PHEV son, respectivamente, de 4,5 y 5 l/100 km. Cabe destacar que estos consumos dados por los fabricantes son referidos a la conducción en carretera. En caso de conducción urbana, la reducción puede ser del 80% en el caso de los híbridos enchufables, y del 50% en el caso de los no enchufables [43].

Atendiendo ahora al consumo propio de los vehículos de combustión interna, se deben tener en cuenta las diferencias existentes entre los diferentes tipos ya mencionados. En la siguiente tabla se muestra el consumo por cada 100 km en términos de litros de combustible, kilogramos, y kWh de energía. Para calcular el consumo real, se multiplica el consumo teórico ofrecido por los fabricantes por un factor de 125%. Este factor corresponde a la predisposición del vehículo a no siempre circular en carretera (que es donde los vehículos de combustión menos consumen por kilómetro), sino también en ciudad. Así mismo, en el cálculo del consumo por cada 100 km de los vehículos de gas, se tiene en cuenta la media de 0,3l/100 km de gasolina que consumen este tipo de vehículos, lo que se representa en la tabla como “+0,3” para el consumo en litros, “+0,2” para el consumo en kilogramos, y “12,2” para representar la densidad energética de la gasolina. Este añadido de consumo de gasolina se debe principalmente al consumo de este combustible que requiere el motor cuando está en frío o cuando se ha acabado el gas. [36].

	Densidad (kg/m ³)	Consumo teórico (l)	Consumo real (l)	Densidad (kg/l)	Consumo real (kg)	Densidad energética gravimétrica (kWh/kg)	Consumo (kWh)
FCEV	-	-	-	-	-	-	29
BEV	-	-	-	-	-	-	18
Gasolina	720	5	6,25	0,72	4,5	12,2	55

Diésel	850	3,9	4,9	0,85	4,16	11,8	49
GNC	190	3,5	4,37+0,3	0,19	0,83+0,2	14 y 12,2	17,2
GNL	450	1,75	2,2+0,3	0,45	1+0,2	13,2 y 12,2	18,6
GLP	560	6,9	8,6+0,3	0,56	4,8+0,2	13,56 y 12,2	67,6

Tabla 12. Consumo de combustible por cada 100 km de los diferentes tipos de un coche compacto tipo medio, en litros, kilogramos, y kWh [44]

Por lo tanto, queda demostrada la importancia de hacer referencia a la unidad en la que se está midiendo el consumo de un vehículo cuando se está llevando a cabo una comparativa entre diferentes tipologías de estos. Se puede observar como los vehículos de gas natural (ya sea comprimido o licuado), presentan el menor consumo en cualquier de los términos. Entre ellos, sin embargo, existen claras diferencias en función de que unidad cuantitativa se esté analizando.

Además, se puede observar como los coches diésel consumen menos que los de gasolina en todos términos, lo que traduce un menor coste por kilómetro recorrido, como, se verá en el apartado 5.4. También destaca el elevado consumo volumétrico del GLP, que se traduce en unos consumos másicos y energéticos también considerables, siendo los más altos de la tabla. Esto se compensa con el menor precio de combustible que el del diésel o gasolina. A continuación, se llevarán a cabo dos comparativas esenciales.

- **ICE vs FCEV**

- El consumo energético de los ICE de gasolina, diésel y GLP es mayor, y la de los GNV menor que la de los FCEV.
- Si se tiene en cuenta la energía eléctrica consumida para generar el hidrógeno necesario (48 kWh), el consumo energético de los FCEV prácticamente se iguala al de los coches de gasolina, diésel y GLP.

- **ICE vs EVs.**
 - A excepción del GNV, el consumo energético de los vehículos de combustión puede llegar a ser del orden de 4 veces mayor al de un vehículo 100 % eléctrico.
 - Esto se debe a la baja eficiencia en la conversión de energía de los vehículos de combustión, en los que gran parte de esta se pierde en calor no utilizable.
 - Como solución, los vehículos híbridos logran utilizar parte de este calor para generar electricidad empleando el propio motor eléctrico como generador, permitiendo reducir el consumo del coche.
 - En cuanto a los vehículos híbridos, en conducción en ciudad, el motor eléctrico se encarga de la mayor parte del trabajo, permitiendo que el consumo de combustible sea muy bajo (hasta cinco veces menor que el que consumiría un vehículo de gasolina), mientras que en carretera los consumos se igualan, pudiendo llegar a ser incluso mayor el de los híbridos, por su mayor peso.

5.3 Eficiencia

Relacionada con la autonomía y consumo, se encuentra la eficiencia. Se definirá eficiencia como la capacidad del vehículo para convertir la energía procedente del combustible o de la electricidad, en energía mecánica para propulsarse. En este aspecto, como se mostró anteriormente, el vehículo eléctrico es el más eficiente.

La eficiencia global del proceso mediante el cual la energía eléctrica llega desde la central de generación hasta la propulsión de los vehículos de hidrógeno es del 30%. Por el proceso se asumen numerosas pérdidas, como son las afrontadas en los procesos de electrólisis, de transporte, distribución y almacenamiento del hidrógeno, y de electrólisis inversa, principalmente. Si se considerase solamente el proceso una vez el hidrógeno está almacenado en el vehículo, la eficiencia total sería del 50% [45].

Para determinar la eficiencia global de los vehículos eléctricos, es necesario atender a la procedencia de la electricidad generada. No es lo mismo la eficiencia de un proceso renovable (se considera del 100% ya que no implica la utilización de energías primarias finitas) que de, por ejemplo, una central térmica cuya eficiencia oscila entre un 35% y un 60% [45].

En cuanto a los vehículos convencionales de gasolina (ICE), aunque los últimos desarrollos en el campo están permitiendo alcanzar eficiencias que se acercan al 30%, en general la eficiencia de este tipo de motores se encuentra en torno a un 25%. Son los motores diésel y los de gas los más eficientes, en torno a un 35%, aunque lejos todavía de la de los vehículos eléctricos. Mientras tanto, los vehículos híbridos presentan una eficiencia ligeramente superior a la de los de pura combustión. Mientras los híbridos no enchufables (que se asemejan más a los coches de combustión interna) tienen eficiencias de en torno al 30% para gasolina, y 40% para los de diésel y gas, los híbridos enchufables son capaces de alcanzar eficiencias de hasta el 50%. En la figura 19 se pueden apreciar esquemáticamente estas características [45].

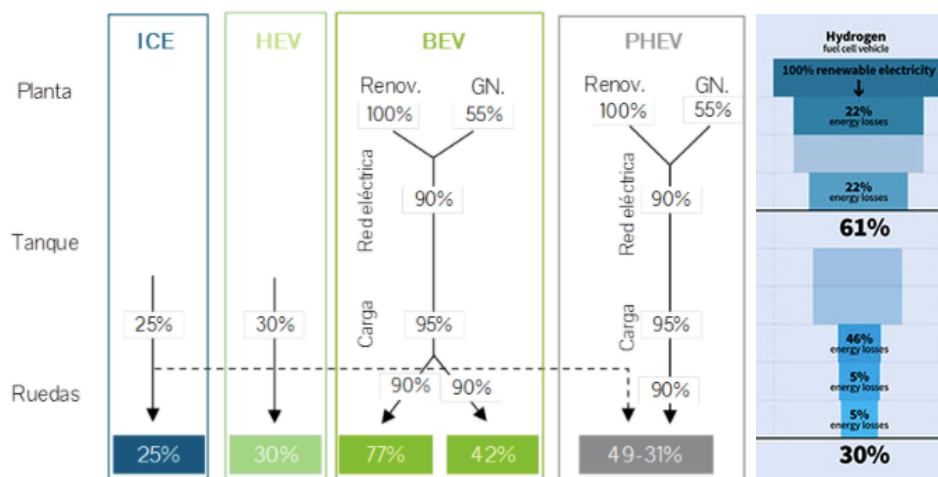


Figura 24. Comparación de la eficiencia total de los BEV, ICE, PHEV, HEV, FCEV [45]

5.4 Precio del combustible

En cuanto al precio del combustible, el vehículo puramente eléctrico vuelve a ganar la batalla al de hidrógeno y demás alternativas (siempre y cuando sea recargado en el domicilio). La Tabla 13 muestra el precio real de recorrer 100 km para las diferentes alternativas de vehículos. Entre ellas, destaca el mayor coste de la gasolina y diésel para recorrer esta distancia, que además se verá agravado con la continua subida del precio de estos carburantes. En cuanto a los coches eléctricos, es importante prestar atención a las dos tipologías de recarga posibles que existen: recarga doméstica y recarga rápida.

Mientras que a la recarga doméstica se le aplica el precio estándar de la electricidad (el de los consumidores domésticos, 0,13 €/kWh), la recarga rápida que se efectúa en puestos de carga es más cara. Esto se debe a varios factores, entre los que destacan el importante desembolso requerido para la instalación, el propio coste de la electricidad, y la escasa demanda.

Combustible	Consumo (l) / 100 km	Densidad (kg/l)	Consumo (kg) / 100 km	Precio combustible	Precio (€)
Hidrógeno (700 bar)	23 l	0,039	0,9	10 €/kg	9
Electricidad (recarga doméstica en valle)	18 kWh	-	-	0,06 €/kWh	1
Electricidad (recarga doméstica normal)	18 kWh	-	-	0,13 €/kWh	2,34
Electricidad (recarga rápida)	18 kWh	-	-	0,4 €/kWh	7,2
Gasolina	6,25 l	0,75	4,7	1,3 €/l	8,1
Diésel	4,9 l	0,85	4,16	1,2 €/l	5,7
GNC	19,5 l + 0,3	0,19	3,7 + 0,2	0,95 €/kg	3,9

GNL	9 l + 0,3	0,43	3,9 + 0,2	0,75 €/kg	3,3
Autogas GLP	8,6 l + 0,3	0,58	4,8 + 0,2	0,66 €/l	6

Tabla 13. Consumo de combustible y coste asociado por cada 100 km de las diferentes tipologías de vehículos, en un coche compacto tipo medio.

Por otro lado, el coste de recarga de los vehículos de pila de combustible es otra de las desventajas principales para la implantación de esta tecnología. Aunque se espera una reducción de este precio de aproximadamente un 50% (como se verá en el apartado 6.1), la diferencia de precios de recarga con los coches eléctricos sigue siendo un impedimento para la incursión de los vehículos de pila de combustible en el mercado.

Los costes de los combustibles GNV y GLP son inferiores a los de la gasolina, el diésel, el hidrógeno, o incluso la electricidad si se ha efectuado una recarga rápida. En este sentido, se podría decir que a día de hoy las alternativas más económicas en cuanto a precio de combustible se refiere, son los coches puramente eléctricos, y los de gas natural. Cabe destacar especialmente el reducido precio al que se podría recargar un vehículo eléctrico en horas de tarifa valle (esto es, cuando la electricidad está a menor precio), diferenciándose claramente del resto de precios. En cuanto a los vehículos híbridos, dependiendo del tipo de conducción a la que se les someta, el precio por recorrer 100 km será uno u otro. Si la conducción es urbana, lo más probable es que el motor eléctrico se encargue de la mayor parte de la propulsión, disminuyendo así el consumo de combustible. En carretera, sin embargo, el consumo es parecido a de los vehículos convencionales de combustión.

5.5 Tiempo y coste de recarga

En cuanto al tiempo de recarga, se podrían clasificar las diferentes tipologías de vehículos en dos grupos: los que tardan en torno a 5 minutos en repostar, y los que tardan

más. La única excepción a esta regla es el híbrido enchufable, que en función de si se recarga o no su batería, podría tardar más o menos tiempo. Tanto los vehículos de combustión interna, como los de pila de combustible y los híbridos convencionales, se recargan en aproximadamente cinco minutos, consistiendo el repostaje en el llenado de un depósito, que puede ser de gasolina, diésel, gas comprimido o licuado, y hidrógeno. Sin embargo, aunque depende del tipo de recarga efectuada, en general lleva más tiempo. En este aspecto, de momento los vehículos de pila de combustible muestran una clara ventaja respecto a los puramente eléctricos.

A continuación, se explican los diferentes tipos de recarga de los vehículos eléctricos, y los costes y tiempos asociados a ellas. En primer lugar, cabe destacar que el tiempo y coste de recarga dependen de la capacidad de la batería, y lo que se está

mostrando son los valores para una capacidad de batería media. En general, los fabricantes recomiendan que, para no viciar la batería antes de lo estipulado, se lleve a cabo la recarga lenta.

1. Carga lenta o doméstica. Es aquella que en general se realiza en el ámbito doméstico. La potencia de estos cargadores monofásicos es de 3,7 kW (voltaje de 230V e intensidad de 16A producen una potencia de 3700 W). Para una batería de capacidad media (50 kWh), por lo tanto, el tiempo de recarga sería de algo menos de 13 horas y media. El coste asociado, sin embargo, vendría determinado por el coste de la electricidad en el domicilio, en torno a 0,15 €/kWh en momento pico, y 0,06 €/kWh en valle, por lo que el coste de recargar la batería sería, respectivamente, de 5,25 € y de 2,1 €.

La siguiente imagen trata de ilustrar la evolución del precio de la luz en un día, y las diferentes tarifas aplicadas para tratar de suavizar el efecto de las puntas y valles que se producen diariamente en la demanda eléctrica del país. Se puede ver como en la tarifa para los vehículos eléctricos, se premia con precios que bajan hasta 0,06

€/kWh a los vehículos que recarguen la batería a partir de las once de la noche aproximadamente



Figura 25. Evolución de las tarifas de la luz durante un día [46]

2. Carga lenta y semi rápida. En este tipo de tomas, se pueden distinguir dos tipos: las monofásicas y las trifásicas. La recarga semi rápida es más frecuente en instalaciones más grandes que un domicilio, como son los parkings de los supermercados, oficinas, centros comerciales, etc... En general, el coste de las cargas semi rápidas está sometido al coste de la electricidad que tienen estas grandes instalaciones, y del cual, generalmente, se hacen cargo las propias empresas. Por lo tanto, recargar el vehículo en este tipo de instalaciones, si la empresa se hace cargo del puesto de carga, sería gratis. Si el poste de carga no está cubierto por la empresa, sin embargo, el precio de la recarga oscilaría entre los 0,25 €/kWh, obteniendo un coste de recarga de la batería de 12,5 €.

- **Corriente Monofásica:** con un voltaje de 230 V, y una intensidad de 32 A, la potencia resultante del cargador es de 7,4 kW, por lo que el tiempo necesario para recargar el vehículo sería de 7 horas. Este tipo de instalación se podría tener también en un domicilio, y todavía se considera como carga lenta.

- Corriente Trifásica: Con un voltaje de 400 V, las intensidades pueden ser de 16 A y de 32 A, para las cuales se obtienen unas potencias de 11 kW y 22 kW respectivamente. Los tiempos de carga, por lo tanto, serían de 4 horas y media y 2 horas y media respectivamente. Aunque los tiempos de recarga empleando corriente monofásica son menores, el coste de la instalación es mayor.
- 3. **Carga rápida.** Este tipo de carga suele trabajar con intensidades de 400 A y 125 V en corriente continua, para lo que se obtiene una potencia de 50 kW. Esta permite recargar el vehículo en 1 hora aproximadamente. El precio medio asociado a una carga rápida oscila entre los 0.29 y 0.38 €/kWh, por lo que el precio medio de recarga de una batería de 50 kWh con este medio sería de 17,5 €
- 4. **Carga súper rápida.** En esta, la potencia oscila entre 130 y 150 kW, con la que se obtiene tiempos de carga de, como mínimo, 20 minutos. El coste asociado a este tipo de recarga es mayor, y se encuentran pocos puntos con estas tecnologías. Las cargas súper rápidas suelen tener costes medios asociados de 0.45 €/kWh, dependiendo de la compañía, por lo que la recarga de una batería con este método costaría 22,5 €.

La Figura 26 pretende mostrar los precios de la recarga súper rápida en España en enero de 2020. La “recarga rápida” que aparece como título de la imagen, en realidad se refiere a la recarga súper rápida explicada en este trabajo.

Ranking de la carga rápida en España (€/kWh)			
1º		0,49	Endesa
2º		0,47	Repsol
3º		0,45	Wenea
4º		0,45	GIC
5º		0,40	EMT Madrid
6º		0,38	Cargacoches
7º		0,36	EDP
8º		0,30	Iberdrola
9º		0,30	EasyCharger
10º		0,00	Honest Charging
N/C		8 € tarifa plana	Ionity
		A 0,20 € para 40 kWh	
enero 2020			

Figura 26. Ranking de precios de recarga súper rápida en España en enero de 2020

- 5. Recarga súper rápida.** La recarga súper rápida es poco frecuente en los puntos de carga, y suele ser parte de infraestructuras de empresas como Tesla. La potencia de sus cargadores puede llegar a los 250 kW, permitiendo tiempos de recarga de 12 minutos, y un coste de 25 € aproximadamente,

5.6 Infraestructura de recarga

En cuanto a la infraestructura de recarga de los FCEVs, si bien la de los vehículos puramente eléctricos es escasa, todavía lo es más la de estos. De hecho, actualmente en España sólo existen 6 hidrogenaras, y de momento no son de uso público, sino que sirven para probar la tecnología. El gobierno español, mediante la “Hoja de Ruta del Hidrogeno Renovable”, pretende instalar entre 100 y 150 hidrogenaras de acceso público antes del 2030 en el país. Deben de ser situadas en lugares accesibles para el consumidor, repartidas por el territorio con una distancia máxima de 250 km entre ellas. Así mismo, el plan pretende que el parque automovilístico español tenga en sus filas entre 5000 y 7000

vehículos de pila de combustible, entre ligeros y pesados, para ese mismo año. Además, prevé una cantidad de al menos 150 autobuses de pila de combustible, con especial contribución a los autobuses urbanos de las ciudades de más de 100,000 habitantes [9].

Sin embargo, si bien la infraestructura de carga de los FCEV es prácticamente nula, la de los vehículos eléctricos también es bastante escasa. El número de puntos de carga de acceso público actualmente es de 7825, como se puede observar en la Figura 27. El informe “ANFAC Automoción 2020 – 2040” de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones establece que el número mínimo de puntos de recarga con los que debería de contar el país para promover la correcta descarbonización del transporte en 2025 y 2030 son 110,000 y 340,000 respectivamente, cubriendo así las necesidades de los supuestos 5 millones de vehículos electrificados que plantea el PNIEC (Plan Nacional de Energía y Clima) [47].

Como se puede observar, la realidad es muy diferente, y a no ser que se lleve a cabo un importante progreso en el campo, será difícil alcanzar estos números. En cuanto a los tipos de recargas, en la Figura 27 se puede observar la distribución de los diferentes tipos de cargadores que hay en las estaciones. En la tabla 8, se explica la distribución de estos puntos de carga en términos de potencia.

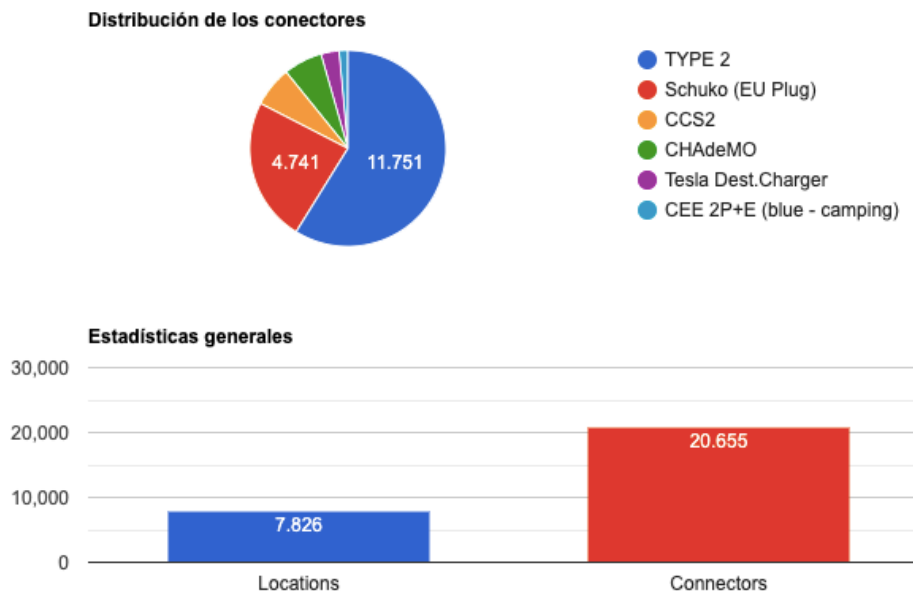


Figura 27. Número de puntos de carga y cargadores en el país. Distribución de los diferentes tipos de cargadores.

El correcto desarrollo de la infraestructura de carga de los vehículos eléctricos se puede analizar atendiendo al barómetro de la electromovilidad desarrollado por ANFAC. Este, además, permite elaborar una comparativa con otros países de la Unión Europea. Textualmente, la asociación explica: “ *El Barómetro de la Electromovilidad pretende, de manera trimestral, analizar la evolución de España y sus comunidades autónomas en penetración de vehículos electrificados y eléctricos puros, así como el nivel de desarrollo de las infraestructuras de recarga de acceso público* ”

Más en concreto, el indicador de Infraestructura de Recarga permite medir el nivel de desarrollo de la infraestructura de recarga pública, atendiendo al número de áreas y puntos de carga. Se compone de dos indicadores que miden el número de infraestructuras con respecto a la población motorizable, y el grado de penetración de la infraestructura rápida y super rápida.

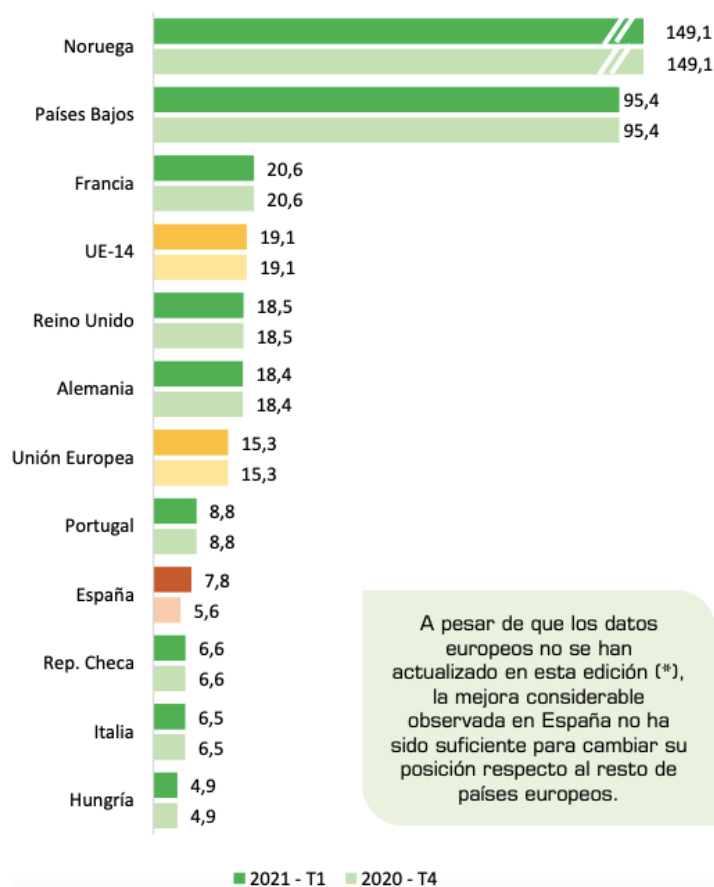


Figura 28. Indicador de infraestructura de recarga ANFAC global en España, comparado con el de otros países europeos. Se indica el valor del primer trimestre del año 2021, y del último trimestre del año 2020.

Se observa, por lo tanto, como el indicador de infraestructura de recarga ANFAC de España ha crecido 2,2 puntos en el primer trimestre de 2021, alcanzando un valor de 7,8 puntos. Este crecimiento se debe principalmente al incremento del 34% en la instalación de estas infraestructuras de acceso público. Sin embargo, aun con este crecimiento, y teniendo en cuenta que los datos europeos no han sido actualizados todavía (como se puede observar en la Figura 28), este progreso no es suficiente para cambiar la posición de España en el ranking, manteniéndose en el cuarto lugar por la cola.

El principal problema que está teniendo España en el desarrollo de su infraestructura de recarga de EV, es que la mayoría de los puntos de carga instalados cuentan con potencias asociadas a carga lenta (inferiores o iguales a 22 kW), situándose

el 83 % de los nuevos puntos se en este rango de potencias. Además, cabe destacar la escasez de puntos de recarga de acceso público de potencia mayor o igual a 100 kW en el ámbito interurbano, lo que impide la recarga ultra rápida de medios de transporte que la podría necesitar en carretera, La Tabla 14 pretende ilustrar el reparto de puntos de recarga en el país, en función de su potencia.

En cuanto a la infraestructura de recarga de los vehículos de combustión interna, es importante diferencia entre los de diésel y gasolina, y los de gas. En cuanto a los primeros, la red de recarga está completamente desarrollada, al ser estos, de momento, los principales combustibles empleados en la automoción. España cuenta con alrededor de 2000 gasolineras, en las cuales se ofrecen ambos combustibles. Considerando una media de ocho surtidores por gasolinera, y el corto tiempo de repostaje de los vehículos de combustión interna, este número de puntos de repostaje es suficiente para satisfacer la demanda actual.

	< 22 kW	22 kW	50 kW	100 kW	250 kW
Nº puntos	5048	1959	638	170	10
Porcentaje	64,5%	25%	8.15%	2,17%	0,13%

Tabla 14. Distribución de los diferentes puntos de carga existentes en el país, clasificados por potencia

Resulta curioso observar como el número de puestos de recarga eléctricos frente al de gasolineras, pues es mayor. Sin embargo, es importante no confundir el concepto de electrolinera con el de punto de carga. Estos últimos pueden (y suelen ser simples instalaciones en lugares públicos o parkings de empresas, supermercados, puntos de acceso público, etc... Mientras tanto, las electrolineras cumplen la misma función que las gasolineras, es decir, compran la electricidad para revendérsela al consumidor, y suelen ofrecer puntos de carga más rápida, a mayor precio, y establecidas en puntos estratégicos. El número de estas es mucho inferior al número total de puntos de carga, y por lo tanto

inferior al número de gasolineras. Además, el requerimiento de un mayor número de puntos de carga de EV viene influenciado por la lentitud de carga de estos vehículos. Mientras los coches de combustión no requieren más de 5 minutos para repostar, los EV necesitan más tiempo, el cual depende del tipo de carga. Como aproximadamente el 60 % de los cargadores actuales son de carga lenta, el requerimiento de un mayor número de puntos de recarga eléctrica que gasolineras es comprensible. Mientras que en un surtidor en 3 horas se pueden repostar 36 vehículos de combustión (considerando 5 minutos por repostaje), en un punto de recarga de 17 kW, solamente se puede recargar un EV.

Por último, la red de infraestructura de recarga de vehículos GNV y GLP no está tan desarrollada. De todas formas, la situación es mucho más favorable para los vehículos de GLP, Mientras el gas licuado de petróleo (autogás) se puede repostar en 600 de las gasolineras del país, sólo 180 de ellas ofrecen gas natural para repostar los vehículos de GNV [48].

5.7 Efecto ambiental

A continuación, se tratará de analizar uno de los temas de mayor importancia en el sector automovilístico actualmente, la contaminación.

Para los vehículos de pila de combustible de hidrógeno, se puede hacer un cálculo sencillo teniendo en cuenta los datos explicados en capítulos anteriores. Actualmente, el 50% del hidrógeno producido procede del reformado del gas natural, y esta cifra se incrementa cuando se refiere a hidrógeno producido para ser utilizado en el sector automovilístico, al 80% [11]. Como se explicó en el apartado 2.4.1.1, en un proceso de reformado de gas natural mediante vapor de agua se emiten 11 toneladas de CO₂ por tonelada de hidrógeno generada. Por lo tanto, mientras que se consumen 0,9 kg de H₂ por cada 100 km recorridos, se consumen 0,009 kg de este por kilómetro, lo que equivale a $0,009 \cdot 11 = 0,1 \text{ kg/km} = 100 \text{ g/km}$ de CO₂ necesarios emitir mediante reformado del gas

natural, lo cual equivale a la contaminación (en términos de CO₂) que emitiría un vehículo diésel moderno.

Si la electricidad procediese de la electrólisis de fuentes renovables, las emisiones del vehículo corresponderían solamente a la fabricación de la batería y del propio coche. En este sentido, por lo tanto, el vehículo de hidrógeno no tiene ninguna ventaja respecto al puramente eléctrico. La necesidad de ambos tipos de vehículos de alimentarse de energía eléctrica procedente de fuentes renovable para poder decir que tienen una huella de carbono neutra, es la misma.

Los vehículos eléctricos, aunque no contaminan durante su funcionamiento, pueden producir contaminación durante su ciclo de vida, debido a su fabricación, y a la generación de la electricidad necesaria para ser propulsados. La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) estima que aproximadamente la mitad de las emisiones de CO₂ de un vehículo eléctrico se emiten en su fabricación, y más concretamente, en la de su batería (que supone el 40% del total de emisiones de fabricación).

Para estimar las emisiones de los vehículos eléctricos por kilómetro recorrido, y poder compararlas con las de los vehículos de combustión y los de hidrógeno, la AEMA establece la procedencia de la energía eléctrica que consumen los EV: el mix energético europeo. Según los datos de esta organización, un vehículo de gasolina emite unos 143 gCO₂/km, mientras que uno eléctrico de características parecidas, que ha sido recargado mediante electricidad procedente del mix europeo, emite unos 65 g/km, lo que supone una reducción del 55%. Un híbrido enchufable, en cuya fase de fabricación de la batería no emite tantos contaminantes (al ser una batería de menor capacidad), tiene la desventaja de consumir más combustible en su funcionamiento, por lo que la reducción de emisiones totales es menor, del 36% [49]. En los híbridos no enchufables, aunque dependiendo del tipo de conducción, la reducción de emisiones totales es menor, en torno a un 10% respecto al equivalente de gasolina o diésel.

En la Figura 29 se muestran esquemáticamente las emisiones totales de CO₂ de los vehículos de combustión y los eléctricos, en función de cada país. Se observa como para el 2030, las emisiones asociadas a la conducción de los vehículos se reducen, debido a la mayor cuota de energías renovables en el mix energético de todos los países. De hecho, el informe de la AEMA estima que de cumplirse los objetivos energéticos de la Unión Europea para los años 2030 y 2050, se estima que las emisiones de CO₂ de los vehículos eléctricos se reducirían a 40 g/km y 15 g/km para los respectivos años.

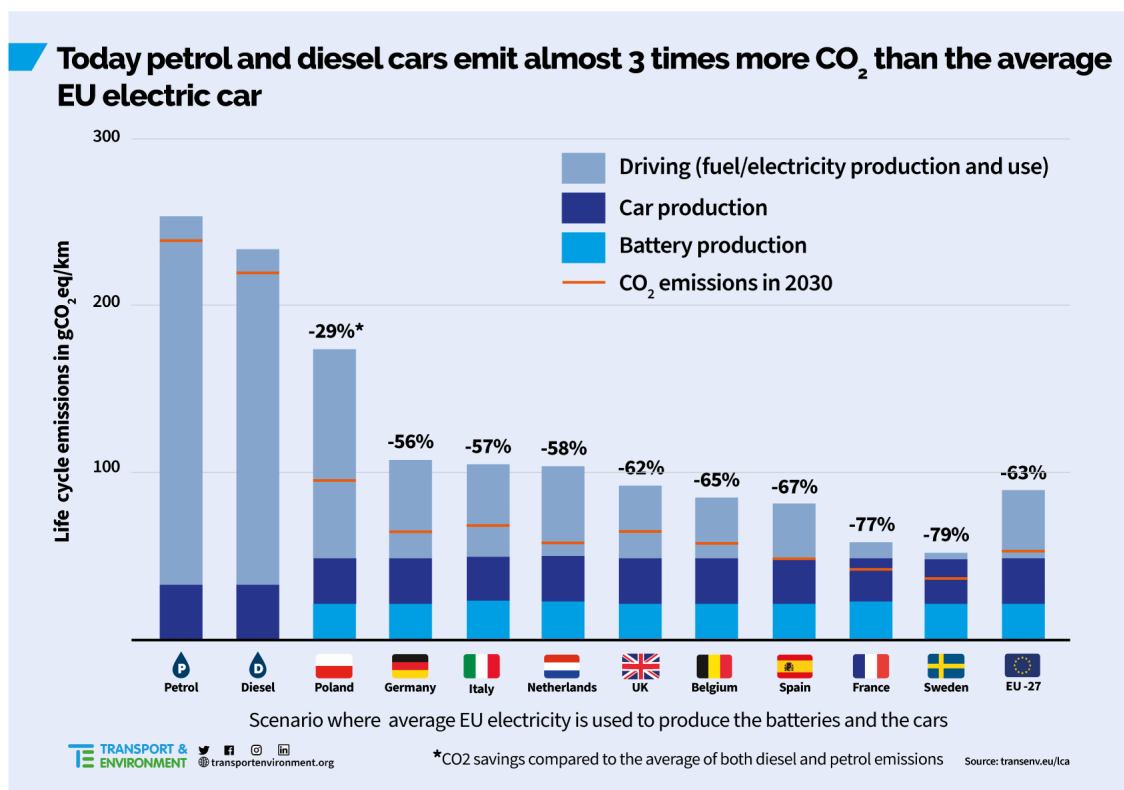


Figura 29. Emisiones de los vehículos eléctricos y de combustión durante su ciclo de vida, teniendo en cuenta la fabricación y conducción de estos, para diferentes países de la Unión Europea

Para determinar el nivel de contaminación de los vehículos híbridos, habría que diferenciar, como ya se ha hecho a lo largo del trabajo, entre conducción de ciudad y conducción de carretera. Mientras que en ciudad los vehículos híbridos no enchufables y especialmente los enchufables pueden llegar a reducir su consumo de combustible a cero, en carretera se comportan prácticamente como vehículos de combustión convencionales.

De acorde con la reducción del consumo mencionado por estos vehículos en conducción en ciudad, la reducción de las emisiones sería de un 80% en el caso de híbridos enchufables, y de un 50% en el caso de los híbridos convencionales. En carretera, las emisiones por kilómetro recorrido serían parecidas, acorde al consumo de estos vehículos.

Aunque durante la fase de producción de los vehículos de combustión interna se emiten en trono a 1,5 veces menos cantidad de CO₂ que en la de los eléctricos, durante su utilización se generan emisiones directas derivadas de la quema del combustible. En este sentido, los vehículos de diésel, al tener una mayor eficiencia energética, emiten en torno a un 25% menos de CO₂ por kilómetro recorrido que los de gasolina, lo cual se debe principalmente a su menor consumo en litros de combustible por kilómetro. De hecho, las emisiones de CO₂ que provoca la combustión de un litro de diésel son mayores que la de gasolina. En cuanto a los vehículos a GLP, se sabe que emiten unos 16,2 g/km de CO₂ por cada litro de este combustible quemado cada 100 kilómetros. Como se consumen 8,4 litros de GLP, por 100 kilómetros recorridos, la emisión total es de 136 g CO₂/100 km. En cuanto al GNC, por cada metro cúbico de gas que se consuma a los 100 km, se emiten aproximadamente 17,7 g/km de CO₂. Considerando un consumo medio de 4 l por cada 100 km, las emisiones de CO₂ serían de 80 g CO₂/100 km.

En la Figura 30 se puede apreciar el porcentaje sobre las emisiones totales que tiene la fabricación o producción del combustible necesario para propulsar el vehículo (representado como W2T, de “Wheel to Tank”). T2W se refiere al porcentaje de emisiones producidas en la combustión directa del combustible.

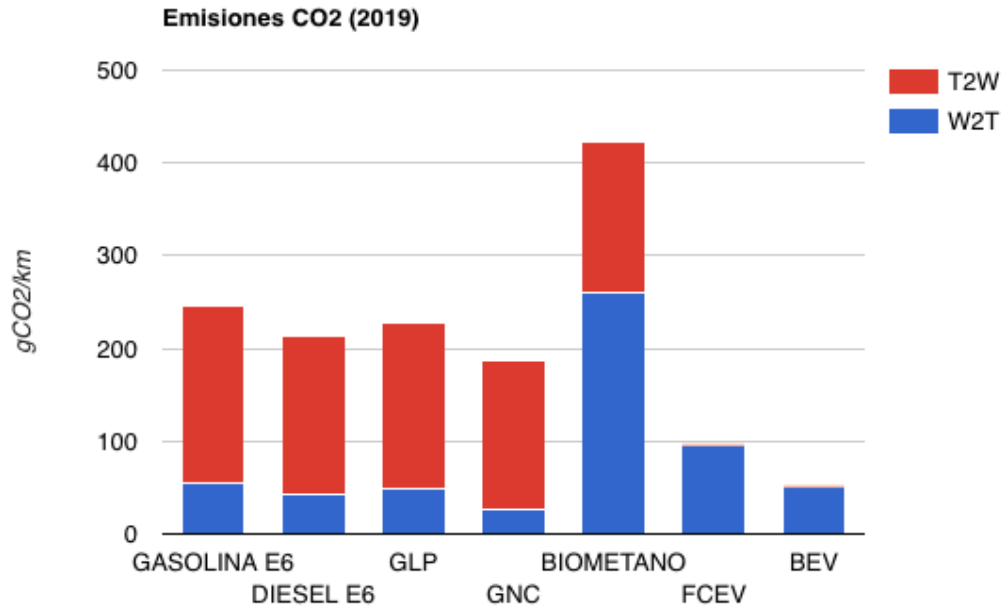


Figura 30. Emisiones por kilómetro recorrido de las diferentes tipologías de vehículos considerado un coche tipo medio, con un tiempo de vida y tasa de utilización medias [50]

La tabla 15 muestra el factor de emisión (e_{CO_2}) de cada tipo de combustible, es decir, la cantidad másica de CO₂ emitida por gramo de combustible quemado. Teniendo en cuenta los consumos medios en kg por cada 100 km de los diferentes combustibles, se pueden calcular las emisiones de CO₂ por cada 100 km de conducción de los vehículos de cada tipo. Se tiene en cuenta que, en los vehículos de gas, se consumen 0,3 l de gasolina por cada 100 km de media, lo que equivale a 0,2 kg de esta. Para calcular las emisiones por cada 100 km, se emplea la siguiente fórmula:

$$E_{CO_2} \left(\frac{g_{CO_2}}{100 \text{ km}} \right) = e_{CO_2} \left(\frac{g_{CO_2}}{g_{combustible}} \right) \cdot consumo_{combustible} \left(\frac{g_{combustible}}{100 \text{ km}} \right)$$

Combustible	Factor de emisión	Consumo cada 100 km	Emisiones CO ₂ (kg) en 100 km
Gasolina	2,32 kg CO ₂ /l	6,25 l	14,5
Diésel	2,68 kg CO ₂ /l	4,9 l	13
GNC	0,6 kg CO ₂ /l	19,5 l + 0,3	12,4

GNL	0,6 kg CO ₂ /l	9 l + 0,3	6,1
GLP	1,61kg CO ₂ /l	8,6 l + 0,3	15.15

Tabla 15. Emisiones de dióxido de carbono de los diferentes tipos de vehículos de combustión interna [50]

Como se puede deducir de la Tabla 15, con respecto a las emisiones de dióxido de carbono de los vehículos de combustión interna, el GNV y el diésel son los combustibles que menos emisiones de CO₂ producen. Sin embargo, no es el dióxido de carbono el único contaminante que emiten los vehículos. Los óxidos de nitrógeno (NO_x), las partículas sólidas (PM), los dióxidos de azufre, los hidrocarburos no quemados, y los monóxidos de carbono, son otros de compuestos peligrosos. En concreto, destacan las emisiones de NO_x y de PM, ya que el resto son eliminables con algunos dispositivos.

Los óxidos de nitrógeno NO_x son especialmente nocivos para la salud de las personas, y se forman a elevadas temperaturas, en las que el nitrógeno y oxígeno del aire se combinan. Los motores de encendido por chispa (gasolina, GNV y GLP), apenas generan este tipo de compuestos, mientras que son los coches diésel los que han tenido problemas relacionados con las altas emisiones de estos. En cuanto a las partículas PM, en la actualidad se pueden reducir sus emisiones eficazmente con filtros que son capaces de contener la mayor parte de ellas.

En la Tabla 16 se presentan los límites de emisiones de NO_x, CO y HC impuestos por las normas europeas en diferentes años. Debido a estas limitaciones, los vehículos han tenido que adaptarse y reducir notablemente la emisión de óxidos de nitrógeno en aproximadamente un 80%.

EU emission limits for gasoline passenger cars (in g/km)

	Effective date*	CO	HC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM	PN
Euro 3	Jan 2000	2.30	0.20	-	0.15	-	-	-
Euro 4	Jan 2005	1.00	0.10	-	0.08	-	-	-
Euro 5	Sep 2009	1.00	0.10	0.068	0.06	-	0.0050	-
Euro 6	Sep 2014	1.00	0.10	0.068	0.06	-	0.0050	6.0x10 ¹¹ **

EU emission limits for diesel passenger cars (in g/km)

	Effective date*	CO	HC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM	PN
Euro 3	Jan 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.0500	-
Euro 4	Jan 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.0250	-
Euro 5	Sep 2009	0.50	-	-	0.18	0.23	0.0050	-
Euro 6	Sep 2014	0.50	-	-	0.08	0.17	0.0050	6.0x10 ¹¹ **

Tabla 16. Límites de emisiones de NO_x, CO y HC impuestos por las normas europeas en diferentes años [51]

5.8 Precio

A continuación, se muestra una comparativa de precio de diferentes tipologías del mismo modelo de un mismo coche en 2018, de la marca Volkswagen. Se ha elegido este modelo en concreto porque refleja de forma precisa la actual realidad de precios de los diferentes tipos de vehículos de gama media en el mercado. Se puede observar que, más allá de la típica diferencia de precio entre los vehículos diésel y lo de gasolina (a favor de estos últimos en un 15%), los vehículos híbridos, y sobre todo los eléctricos, aunque todavía tienen un precio mayor con respecto a su equivalente de gasolina, pueden ser resultar iguales o incluso en el largo plazo. De hecho, para este modelo concreto, el vehículo eléctrico ya presenta paridad de precio con el diésel, algo que todavía no se da lugar en todas las marcas.

En este caso, por ejemplo, el híbrido es un 8% más caro que el correspondiente de gasolina, pero un 7% más barato que el de diésel. Mientras tanto, los puramente eléctricos,

aunque todavía no han alcanzado los precios de compra de los vehículos de combustión interna, les falta poco, siendo en este caso el modelo puramente eléctrico un 20% más caro al equivalente de gasolina, pero solo un 0,7% al de diésel.

MODELO	PRECIO
Volkswagen Golf 5 puertas Style 1.5 TSI 150 CV (Gasolina)	28.116 €
Volkswagen Golf 5 puertas Style 2.0 TDI 150 CV DSG (Diésel)	32.750 €
Volkswagen Golf 5 puertas Style 1.5 eTSI 150 CV DSG (Híbrido)	30.438 €
Volkswagen Golf 5 puertas ePower 136 CV (Eléctrico)	32.982 €

Tabla 17. Comparativa de precios para un mismo modelo Volkswagen de 2018

Pero en esta comparativa de precios no se atenderá únicamente al precio de compra, sino a los costes asociados a la vida del vehículo. En este sentido, además de los costes del seguro, mantenimiento e impuestos, el principal diferenciador es el coste de combustible por kilómetro recorrido, como se puede corroborar en la tabla 13. Aunque actualmente el precio de la recarga rápida se pueda equiparar al precio del combustible (en términos de kilómetros recorridos), la recarga doméstica, e incluso la semi rápida, permiten precios por kilómetro recorrido mucho inferiores a los de los vehículos convencionales.

Teniendo en cuenta un precio de recarga doméstico de 0,13 €/kWh, el coste por kilómetro de los vehículos eléctricos sería un punto importante a favor de estos. En cuanto a los vehículos híbridos, dependería de que tipo de híbrido se está considerando para poder llevar la comparativa de costes. En este caso, se trata de un “híbrido suave”, cuya batería tiene una capacidad de 0,5 kWh, la ventaja económica en términos de combustible no es grande, puesto que el motor eléctrico no puede impulsar el vehículo por sí mismo, sino que sirve para reducir el estrés del motor de combustión, o a ayudarlo a arrancar y detenerse antes de tiempo. Como se ha ido comentando a lo largo de trabajo, esto depende del tipo de conducción. Si el vehículo híbrido suave está destinado a una conducción urbana, la reducción del precio del combustible sí sería notable.

Por lo tanto, puesto que el tamaño de la batería del híbrido de este modelo es de 0,5 kWh, el coste asociado a ella apenas se ve reflejado, razón por la cual la alternativa híbrida suave es más barata que la diésel. Si el híbrido fuese un híbrido normal, o un híbrido enchufable, los precios serían mayores, teniendo en cuenta un precio actual por kWh de la batería eléctrica de 126 €, y que los híbridos convencionales tienen de media una batería de 1,5 kWh, y los híbridos enchufables de 10 kWh.

Con todo ello, se puede estimar el coste de conducción de cada alternativa teniendo en cuenta los precios de combustible y energía eléctrica definidos en la Tabla 13. Se considerarán dos casos diferentes para la carga de los vehículos eléctricos: carga en valle, y cargas super rápidas (es decir, los dos extremos en cuanto a precio que se pueden tener). Además, se considerará un horizonte temporal de 5 años, y, una conducción media de 15,000 kilómetros al año. Así mismo, se supondrá un precio de la gasolina y de la electricidad constante, con el fin de simplificar el análisis.

La siguiente tabla pretende ilustrar los costes anuales de mantenimiento y combustible para cada tipo de vehículo (los costes de seguro se han supuesto iguales entre cada tipología). Se observa como los costes de mantenimiento son menores cuanto más eléctrica es la alternativa. Esto se debe a que los vehículos eléctricos tienen muchas menos piezas mecánicas sometidas a elevadas temperaturas e importantes esfuerzos en comparación con los vehículos de combustión. Se considerarán costes medios de seguro estipulados por las principales aseguradoras, así como costes medio de mantenimiento estipulados por los principales talleres. El coste de mantenimiento de los híbridos, , sin embargo, al contar con las dos tecnologías (eléctrica y de combustión), no suelen presentar importantes reducciones con respecto a los vehículos de combustión interna.

Así mismo, en la Tabla 18 se muestra el consumo de combustible o energía de cada tipo de vehículo, obtenidos por la guía del fabricante. Se considera el consumo combinado WLTP (que representa el consumo real), elaborando una media ponderada entre tanto la conducción urbana como la de carretera.

	WLTP consumo combinado por cada 100 km		
Tipo de vehículo	Densidad energética volumétrica (kWh/l)	Consumo energético (kWh/100 km)	Consumo en litros (l/100 km)
Gasolina	9	51,3	5,7
Diésel	10	46	4,6
Híbrido suave	9	53	5,9
Eléctrico	-	15,4	-

Tabla 18. Consumo WLTP combinado por cada 100 km de los diferentes tipos de vehículo, indicado por el fabricante.

Para calcular el coste del combustible, se emplea las siguientes fórmulas, para los diferentes casos. Se considera una distancia recorrida media anual de 15,000 km.

- Gasolina, diésel e híbrido suave:

$$\text{consumo}_{\text{anual}}(l) = \text{distancia}_{\text{anual}}(km) \cdot \text{consumo}_{\text{por kilómetro}}(l/km)$$

$$\text{Coste}_{\text{anual}} = \text{consumo}_{\text{anual}}(l) \cdot \text{precio}_{\text{combustible}}(€/l)$$

Gasolina:

$$\text{consumo}_{\text{anual}} = 15,000 \text{ km} \cdot 5,7 \left(\frac{l}{100 \text{ km}} \right) = 855 \text{ l}$$

$$\text{Coste}_{\text{anual}} = 855 \text{ km} \cdot 1,3 (€/l) = 1111 \text{ €}$$

Diésel:

$$\text{consumo}_{\text{anual}} = 15,000 \text{ km} \cdot 4,6 \left(\frac{l}{100 \text{ km}} \right) = 690$$

$$\text{Coste}_{\text{anual}} = 690 \text{ km} \cdot 1,2(€/l) = 828 \text{ €}$$

Híbrido suave (MHEV):

$$consumo_{anual} = 15,000 \text{ km} \cdot 5,9 \left(\frac{l}{100 \text{ km}} \right) = 885$$

$$Coste_{anual} = 885 \text{ km} \cdot 1,3(\text{€/l}) = 1150 \text{ €}$$

- Eléctrico de batería:

$$consumo_{anual} = 15,000 \text{ km} \cdot 15,4 \left(\frac{kWh}{100 \text{ km}} \right) = 2310 \text{ kWh}$$

$$\text{Recarga doméstica en valle: } Coste_{anual} = 2310 \text{ kWh} \cdot 0,08(\text{€/l}) = 185 \text{ €}$$

$$\text{Recarga rápida: } Coste_{anual} = 2310 \text{ kWh} \cdot 0,3(\text{€/l}) = 693 \text{ €}$$

	Coste anual (€/año)		
Tipo de vehículo	Seguro	Mantenimiento	Combustible
Gasolina	500	413	1111
Diésel	500	500	828
Híbrido suave	500	425	1150
Eléctrico (en valle)	500	117	185
Eléctrico (rápida)	500	117	693

Tabla 19. Precio anual del combustible, seguro y mantenimiento

A continuación, se muestra el precio total al cabo de cinco años:

	Coste tras cinco años (€/año)			
Tipo de vehículo	Seguro	Mantenimiento	Combustible	Total
Gasolina	2500	2500	5555	10555

Diésel	2500	2500	4140	9140
Híbrido suave	2500	2500	5750	10750
Eléctrico (en valle)	2500	585	925	4010
Eléctrico (rápida)	2500	585	3465	6550

Tabla 20. Precio total del combustible, seguro y mantenimiento al cabo de cinco años

Por último, se añade el precio de compra a los costes calculados durante cinco años de circulación, estimando así los costes totales asociados al vehículo al cabo de 5 años.

	Gasolina	Diésel	HEV	BEV (valle)	BEV (rápida)
Coste	39106	41890	41100	37000	39532

Tabla 21. Costes totales de los diferentes tipos de vehículos tras cinco años

6 EL FUTURO DE LOS VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO

6.1 Futuro precio de la producción de hidrógeno verde

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el precio medio actual de producción de hidrógeno mediante el reformado de gas natural es de 1,2 €/kg en el caso sin captura de CO₂, y 2 €/kg en el caso con captura. Teniendo en cuenta la densidad energética gravimétrica del hidrógeno (33,3 kWh/kg), el precio por cantidad energética producida sería de 0,036 y 0,06 €/kWh respectivamente. Sin embargo, puesto que el principal factor contribuyente al coste de producción de hidrógeno mediante el reformado del gas natural es el precio de la materia prima (el propio gas), el cual depende principalmente de la región de estudio, los precios varían según este factor [52].

La Figura 31 pretende ilustrar estas fluctuaciones. Los costes asociados al color verde corresponden a la compra de materia prima, mientras que los azules oscuros y claros a los costes de operación e inversión respectivamente. La unidad monetaria representada son los dólares, por lo que sería necesario multiplicar por un factor de 0,85 para pasarlo a euros. Además, las cantidades se muestran referidas al kilogramo de hidrógeno producido (€/kg), teniendo en cuenta el factor de carga y producción media de una planta de reformado actual [52].

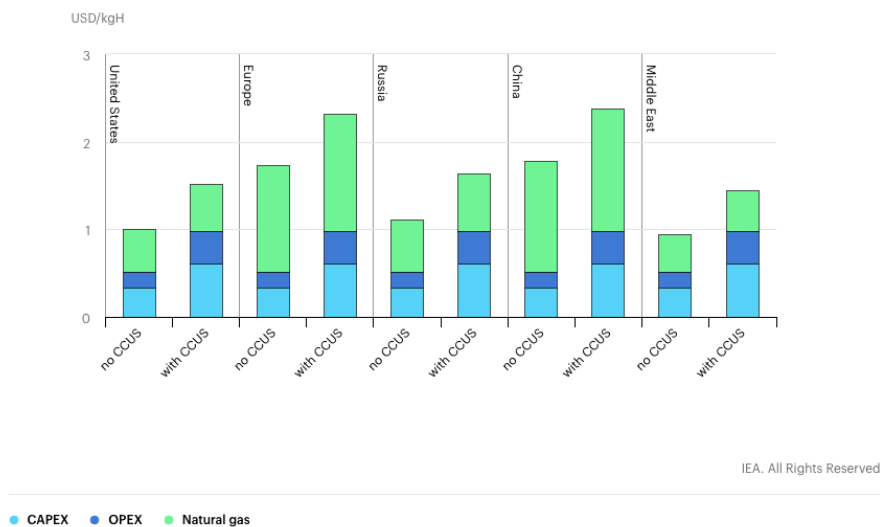


Figura 31. Coste unitario de producción de un kilogramo de hidrógeno, mediante el método de RGN con o sin captura del CO₂, para las diferentes regiones del mundo [52]

Sin embargo, bajo el objetivo europeo de la descarbonización de la economía, no serviría de ayuda producir el hidrógeno mediante este método, debido a su impacto medioambiental. Por lo tanto, aunque se encuentre en desventaja económica en la actualidad, el método idóneo para poder producir hidrógeno verde es la electrólisis del agua. Para producir 1 kg de H₂ mediante este método (equivalente 33,33 kWh de energía), teniendo en cuenta los costes fijos y variables de la instalación, el kilogramo de H₂ cuesta 5 € de media. En términos energéticos, equivaldría a un coste total de 0,15 €/kWh, lo que, teniendo en cuenta la eficiencia de una planta electrolítica (66%), equivaldría a un coste de electricidad de 0,1 €/kWh. Si se tienen en cuenta los actuales costes de distribución del hidrógeno, que reducen la eficiencia en el proceso un 22%, se obtiene un precio de compra de $5/0,78 = 6,4$ €/kg. Si al precio de compra se le añade el margen de beneficio que una hidrogenadora tendría que aplicarle para obtener su beneficio, se obtendría el precio actual de aproximadamente 8-9 €/kg. [53]

Los procesos de reformado llevan años en funcionamiento, y el potencial de reducción de precio no es tan elevado como en el caso de la electrólisis. Además, los factores de carga de este tipo de plantas ya son elevados, y los costes de producción llevan años tratándose de reducir. Por lo tanto, los costes unitarios de producción se considerarán constantes en los próximos años. Por lo tanto, enfocando el estudio en Europa y haciendo la conversión de dólares a euros, se obtiene un precio final de 1,28 €/kWh para el caso sin captura de CO₂, y de 1,95 €/kWh para el caso con ella. [54]

- **Sin captura de CO₂:** 1,28 €/kWh.
- **Con captura de CO₂:** 1,95 €/kWh para el caso con ella.

Con el objetivo de predecir los costes unitarios de producción de hidrógeno mediante el proceso de electrólisis en el 2030, se tienen en cuenta varias consideraciones

respecto al funcionamiento medio estimado de una planta electrolítica en el 2030. Todas ellas son estimaciones fundamentadas en hipótesis, y se muestran a continuación. [55]

- **Eficiencia:** 66%. La eficiencia corresponde al rendimiento con el cual la planta convierte la energía eléctrica en hidrógeno.
- **Tasa de producción:** 20,000 m³/h de H₂ = 43,000 kg/día de H₂. Densidad H₂ = 0,0899 kg/m³ a temperatura y presión ambientes.
- **Factor de carga:** 40%
- **CAPEX:** 400 \$/kW. Los actuales costes asociados a la inversión de las plantas electrolíticas se encuentran entre 1100 y 1500 \$. Se prevé una bajada de un 70% para el 2030, pudiendo alcanzar CAPEX de 400\$/kW. Esta reducción se puede corroborar en la siguiente figura [55].

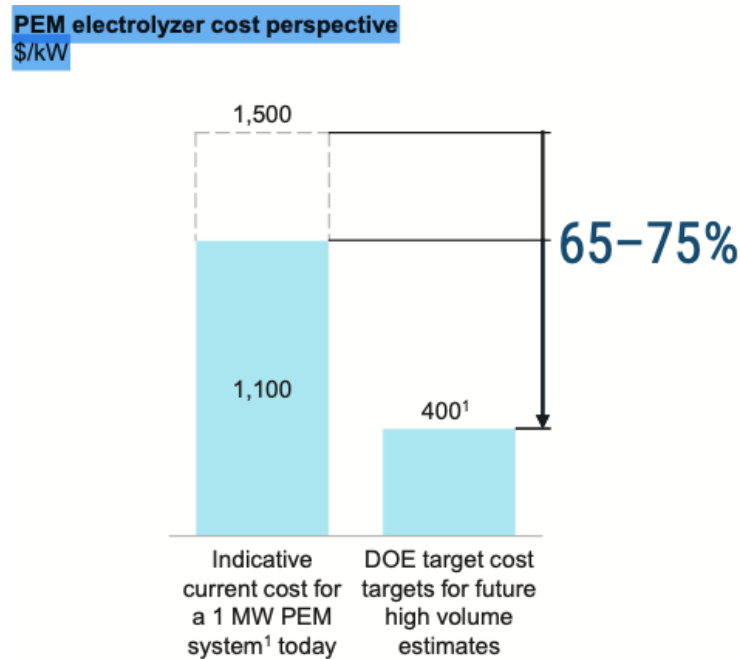


Figura 32. Bajada del precio de los electrolizadores en 10 años

Además, se sabe que la reducción de los costes del hidrógeno verde para el 2030 es el resultado de tres factores. De acuerdo con un estudio realizado por S&P Global [54].

- **Electricidad:** Esta representa el 60% de los costes unitarios totales de la producción de la planta. Se estima que una disminución de 10 \$/MWh en el precio de la energía reduciría el coste del hidrógeno en 0.4 - 0.5 \$/kg.
- **CAPEX:** El electrolizador representa la mayor parte del coste de inversión de la planta. Se estima que una reducción de 250 \$/kW en el costo de capital del electrolizador, reduciría el coste del hidrógeno en otros \$ 0.3- \$ 0.4/kg.
- **Factor de carga:** El aumento del factor de carga de un 10% reduciría el costo del hidrógeno en otros 0.2 - 0.3 \$/kg

Teniendo en cuenta una eficiencia prevista del 66%, se puede predecir la influencia que tendrían los principales costes variables de la planta (la electricidad), en el precio por kilogramo final del hidrógeno producido por esta. Antes de ello, se debe añadir el coste fijo asociado a cada kilogramo producido. Teniendo en cuenta las consideraciones de la planta anterior, el coste que se obtiene es de 0,8 \$/kg de H₂ producido [55]. La gráfica a realizar pretende hallar el precio de la electricidad para el cual el coste unitario de producción de hidrógeno por electrólisis en el 2030 podrá ser igual al del reformado del gas natural. En la misma, se incluirán los precios de las dos alternativas propuestas de reformado de gas natural, es decir, con y sin captura del dióxido de carbono.

Teniendo en cuenta que se representará el coste por unidad de masa de hidrógeno producido de hidrógeno frente al precio de la electricidad, se puede calcular la pendiente de la recta mediante la eficiencia del proceso (66%). Se define eficiencia como la cantidad energética de hidrógeno producida entre la cantidad de energía eléctrica necesaria durante el proceso electrolítico. Considerando una eficiencia del 66%, para producir un kilogramo de hidrógeno, que corresponde a una cantidad energética de 33,33 kWh, se necesitarían $33,33/0,66 = 50$ kWh de electricidad, por lo tanto:

$$\left(\frac{\frac{\text{€}}{\text{kg}_{H_2}}}{\frac{\text{€}}{\text{kWh}_{\text{electricidad}}}} \right) = \left(\frac{\text{kWh}_{\text{electricidad}}}{\text{kg}_{H_2}} \right) = \left(\frac{50 \text{ kWh}}{1 \text{ kg}_{H_2}} \right) = 50 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{H_2}}$$

$$= 50 \left(\frac{\text{€/kg}_{H_2}}{\text{€/kWh}_{\text{electricidad}}} \right)$$

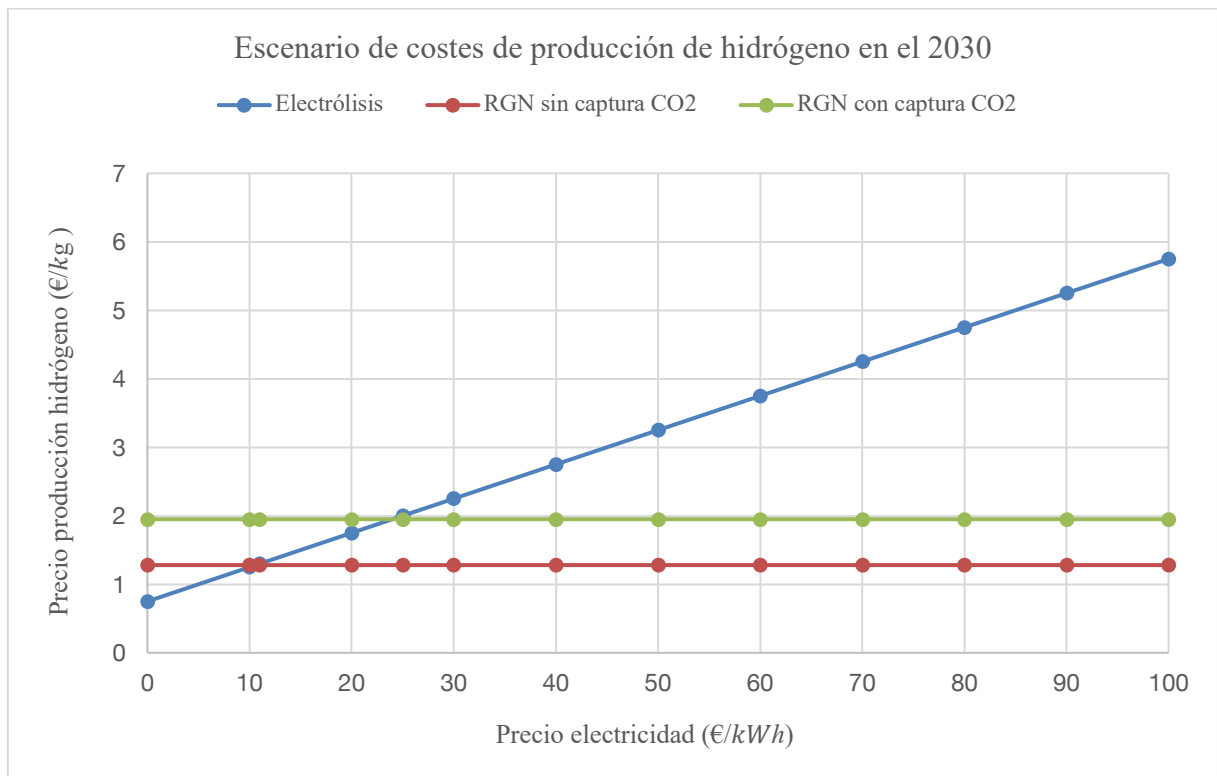


Figura 33. Escenario de costes de producción de hidrógeno en el 2030

De la figura mostrada, se deduce que el precio de la electricidad necesario para igualar los costes de producción de las plantas de reformado con captura de CO₂ en el 2030 es de 25 €/MWh, y de 11 €/MWh para las plantas sin captura de estos gases. En kWh, esto quedaría como 0,025 €/kWh, y 0,011 €/kWh.

El precio de la electricidad se establece en el mercado libre de la electricidad español cada día. En él, los compradores lanzan sus ofertas de compra y los vendedores las de venta. El precio donde se cruzan ambas gráficas correspondería al precio final de la electricidad para los actores del mercado. En realidad, tras la primera casación, los

operadores del sistema reajustan el precio final en función las restricciones técnicas que haya, pero en general, el precio final es parecido al inicial de casación. En la Figura 33 se puede apreciar el comportamiento del mercado para un cierto día.

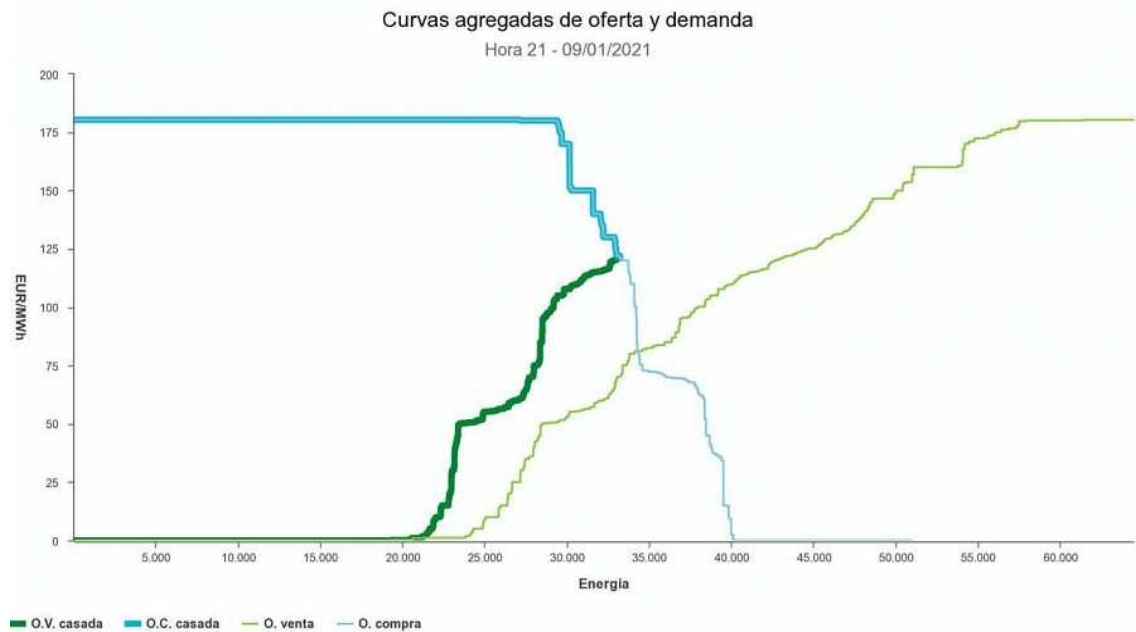


Figura 34. Curvas agregadas de oferta y demanda en el mercado ibérico de la electricidad (MIBEL), en el día 09/01/2021, a las 21:00 horas [56].

Este concepto se introduce para entender porque la incursión de una mayor cuota de energías renovables en el mix energético español produciría un precio de mercado de la electricidad menor. Las energías renovables y la energía nuclear son las que normalmente ofertan a precios de venta más baratos, pudiendo llegar a incluso a cero en algunos casos. Por lo tanto, una mayor cuota de mercado de las energías renovables podría disminuir el precio de mercado o “marginal” que se establece en el mercado. La estimación de la distribución de la generación de electricidad en España se muestra en la Figura 34. En ella, se puede ver como para el 2030 la cuota de generación de energías renovables alcanzará el 60%.

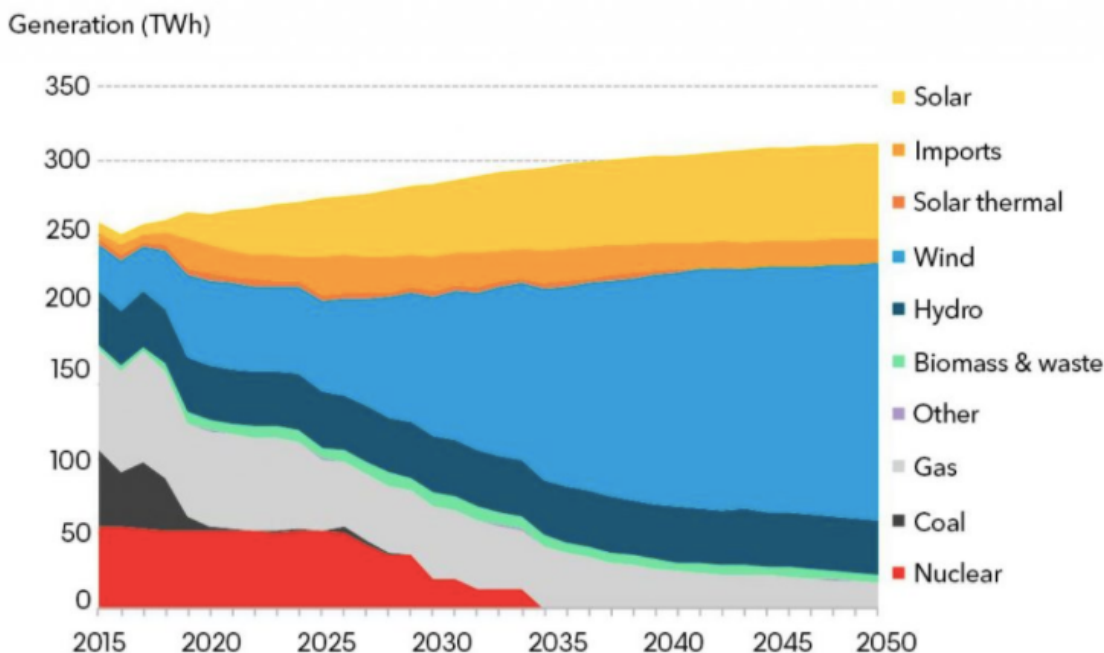


Figura 35. Distribución de la generación de electricidad en España. Se muestran datos reales (2015-2021), y datos estimados (2021-2030) [57].

Con ello, la entidad financiera Goldman Sachs prevé que, en 2030, debido a la estimada cuota de 60% de renovables en el parque de generación español, se reducirá el precio de mercado medio en un 40% respecto al año 2020, quedando el precio marginal medio en torno a 30 €/MWh, lo que equivale a 0,03 €/kWh [58].

Para este precio, atendiendo a la Figura 32, se obtendría un coste de producción por unidad de masa de hidrógeno de 2,25 €/kg. Este es solamente un 15% superior al precio unitario que se tendría mediante el reformado del gas natural con captura del CO₂ (1,95 €/kg), por lo que se puede concluir que la paridad de precios entre ambos métodos se podría alcanzar en los primeros años de 2030 en Europa, e incluso antes en otras regiones como Estados Unidos o el Oriente Medio.

Así mismo, la mencionada reducción del precio de la electricidad afectará también al coste de repostaje de los vehículos eléctricos, que podrá ser un 40% inferior en el 2030. En cuanto al precio de repostaje de hidrógeno, teniendo en cuenta las pérdidas de energía correspondientes a los procesos de transporte y almacenamiento del hidrógeno (22%

[59]), y el margen que aplica al hidrogena, se obtendría un precio de venta al público (PVP) de $(2,25/0,78) \cdot 1,3 = 3,75$ €/kg, lo que se corresponde con una reducción del precio de aproximadamente un 60% respecto al valor actual. Se estima que, considerando el coste actual de la gasolina, el precio del hidrógeno a partir del cual sería igual más rentable repostar que el de gasolina, es de 8 €/kg [60]. Por lo tanto, la reducción al precio de 3,75 €/kg ofrecería unos precios muy competitivos respecto a los vehículos de combustión.

6.2 Futuro precio del vehículo de hidrógeno

Aunque algo incierto, se estima que el precio de los vehículos de pila de combustible será competitivo respecto al de los vehículos eléctricos de batería y a los convencionales de combustión, cuando el coste de la pila de combustible sea de 50 €/kW, (considerando, además, un precio de fabricación de la batería de 100 €/kWh) [60]. Actualmente, los principales contribuyentes a los elevados precios de los coches eléctricos y a los de hidrógeno son, respectivamente, el coste de las baterías eléctricas y el de las celdas de combustible.

Por ejemplo, para una batería media de capacidad 50 kWh, a un precio de fabricación de 150 €/kWh, se obtendría un coste adicional de 7500 € respecto a un vehículo de combustión interna, procedente únicamente de la batería. Para una potencia de la pila de combustible de 95 kW [61], a un precio actual de fabricación de 125 €/kW [55], se obtiene un precio total de 12,000 €, que añadido a la reducida economía de escala de fabricación, hace de los vehículos de hidrógeno una alternativa bastante más cara que la de los vehículos los puramente eléctricos. En el apartado 6.3, se demostrará que apenas 3 años son necesarios para que el precio de las baterías se sitúe en torno a los 100 €/kWh, sinónimo de paridad de precio con los coches de combustión interna convencionales. En cuanto al precio de las pilas de combustible, se usarán datos históricos para poder estimar la evolución que tendrá en el futuro.

En la Figura 35 se puede ver como, para una producción anual de aproximadamente 130,000 vehículos, el precio por kW de fabricación de las celdas de combustibles llega a los 50 €/kW (pasando los \$ a €). Por lo tanto, apoyándose en los datos de esta gráfica, se estimará en que año la producción anual alcanzará esa cifra.

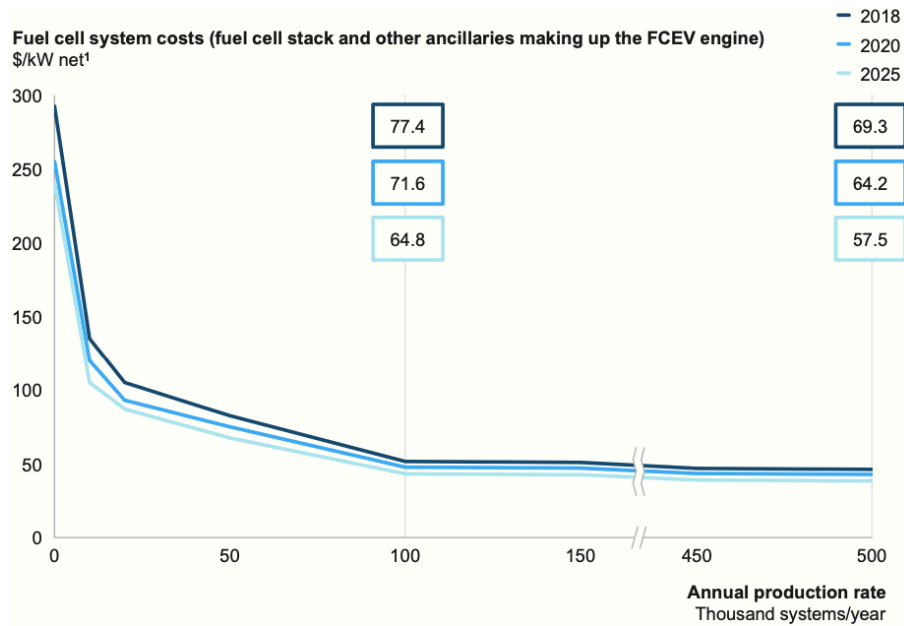


Figura 36. Costes del sistema completo de celda de combustible en función de la producción anual en miles de unidades [55].

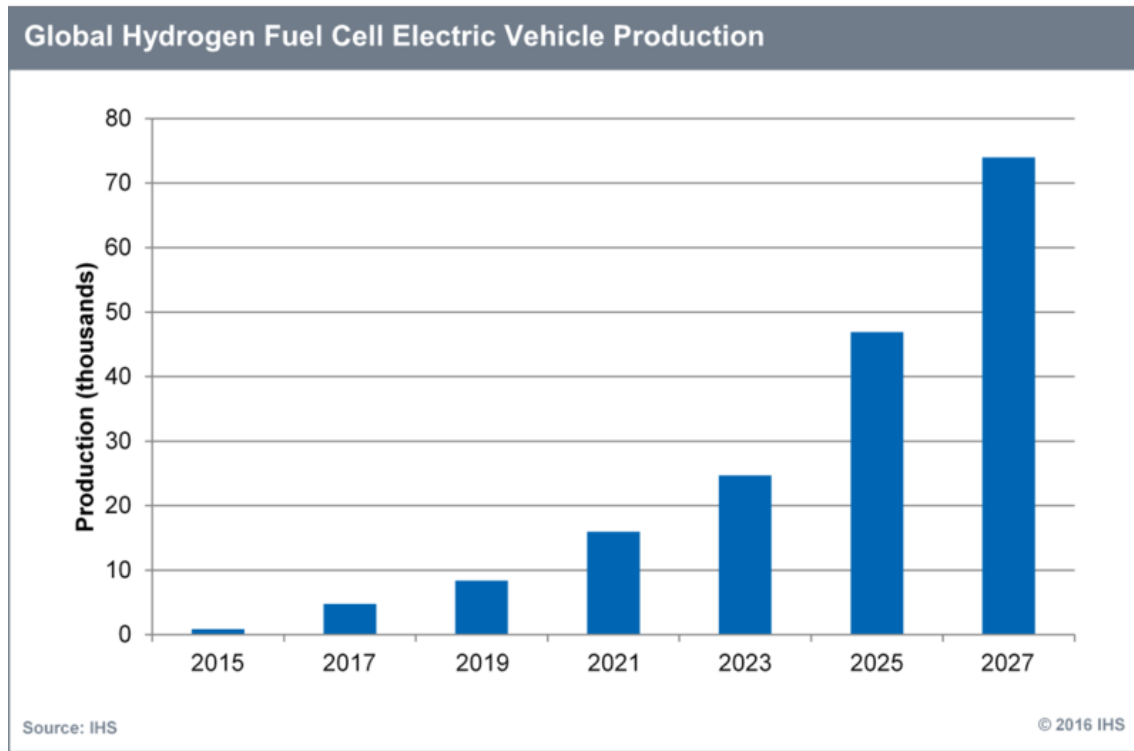


Figura 37. Evolución histórica y estimación de la producción de vehículos a nivel global [62].

Con estos datos, se pretende dilatar el rango temporal en el que se lleva a cabo la estimación de la Figura 36, con el fin de estimar en que año se logrará la paridad de precios entre una tecnología y otra (en lo que concierne al principal coste de estas), considerando que esta se alcanzará cuando la fabricación de vehículos eléctricos alcance las 130,000 unidades anuales, como se vio en la Figura 35. La gráfica de la estimación realizada se muestra a continuación. Para ella, se ha realizado una estimación de tipo potencial de la evolución de la producción de vehículos de pila de combustible con los años.

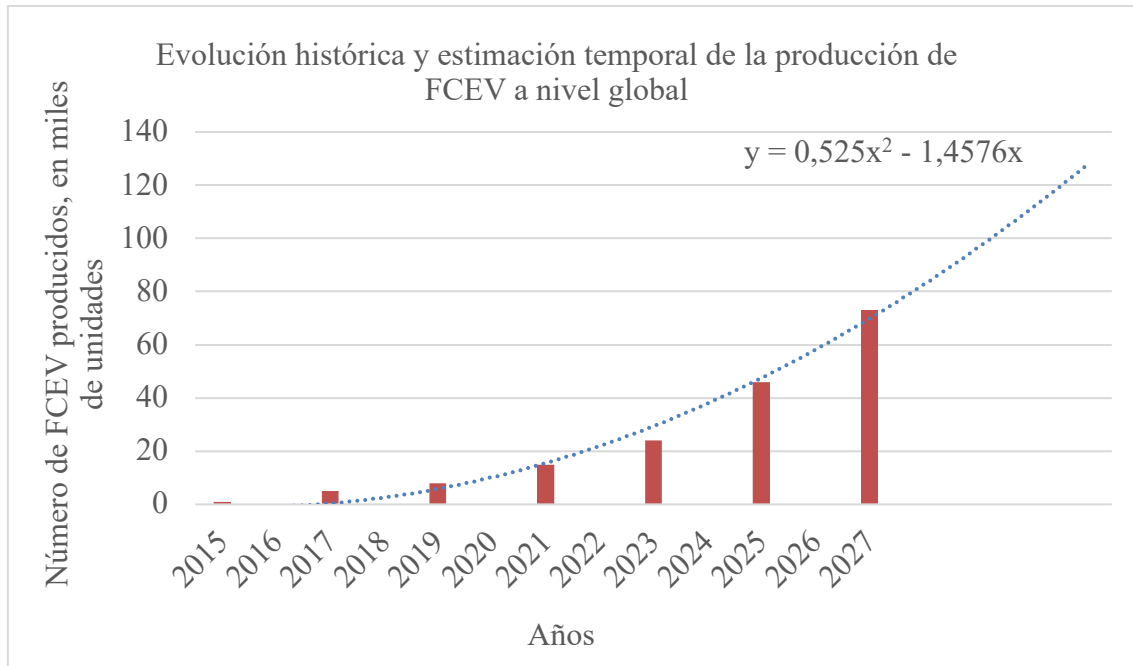


Figura 38. Evolución histórica y estimación temporal de la producción de FCEV a nivel global [55].

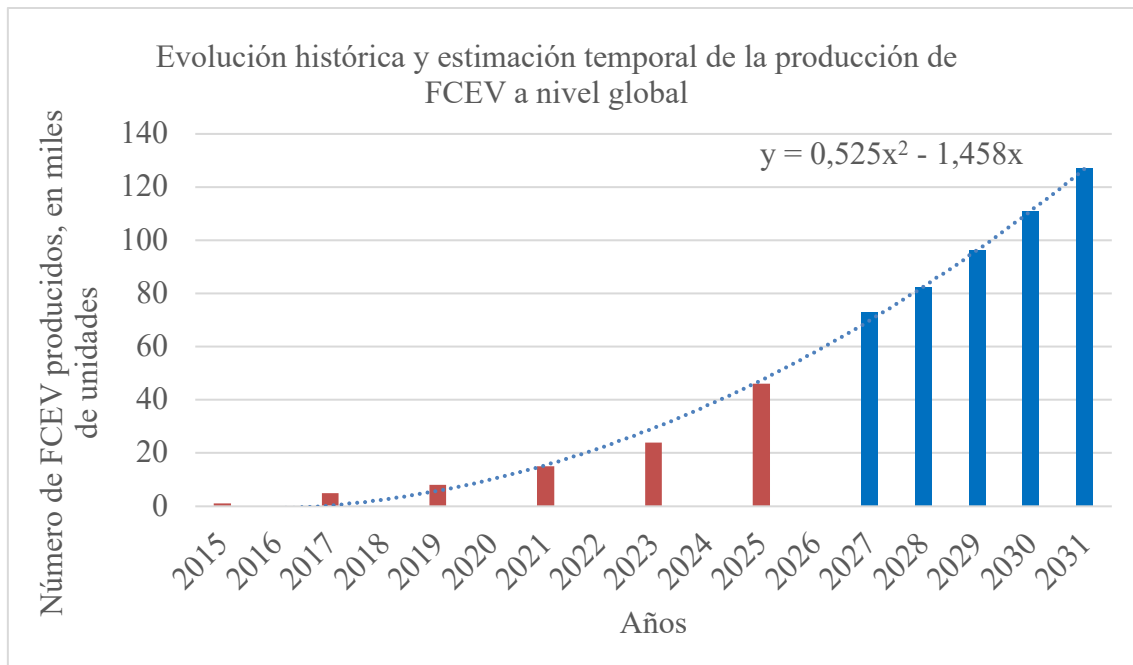


Figura 39. Evolución histórica y estimación temporal de la producción de FCEV a nivel global [55].

Se observa que el año en el cual se supera la cifra de 125,000 vehículos de FCEV producidos es el 2031, para el cual el coste que conllevaría fabricar una celda de combustible sería de 50 €/kW. Considerando una celda media de 95 kW [61], el precio total sería de $50 \cdot 95 = 4750$ €, frente al coste actual, que sería de $140 \cdot 95 = 13,000$ €. Se produce, por lo tanto, una reducción del precio de $13000 - 4750 = 8250$ €, proveniente únicamente de la celda de combustible.

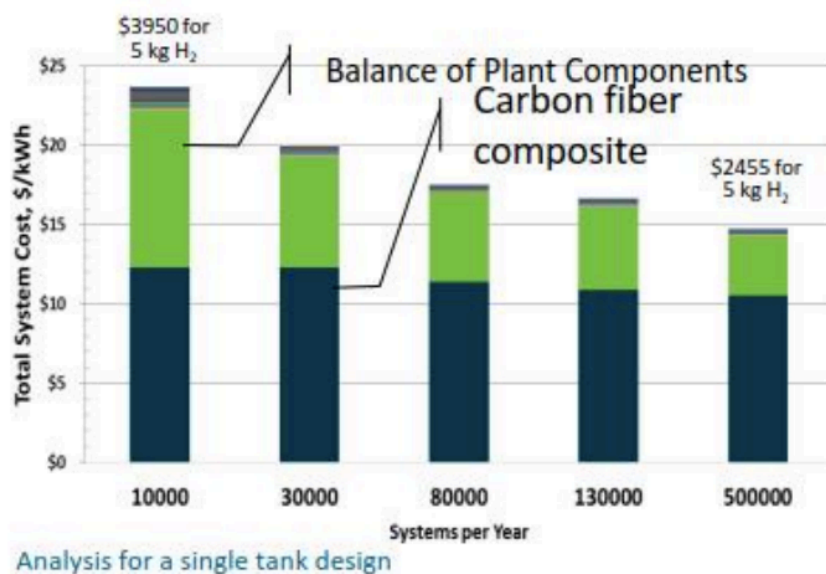


Figura 40. Evolución del coste de los tanques de hidrógeno vehiculares

En la Figura 39 se puede observar la evolución del precio total de los depósitos de hidrógeno necesarios para almacenar 5 kg de este en un vehículo (podría ser un único depósito). Se puede ver como el precio se indica en valores unitarios, por kWh de hidrógeno almacenado. Teniendo en cuenta que se pretende almacenar 5 kg de H₂, y que este tiene un PCI de 33,33 kWh/kg, se puede calcular el precio absoluto total correspondiente a precio unitario multiplicando este último por $5 \cdot 33,33$. Por lo tanto, se tienen los siguientes datos:

- Producción anual de 10,000 (aproximadamente la actual): 3950 \$
- Producción anual de 130,000: $5 \cdot 33,33 \cdot 16,5 = 2750$ \$

- Reducción de precio de 2021 a 2030: $(3950 \$ - 2750 \$) \cdot 0,85 \text{ €/} \$ \cong 1000 \text{ €}$

Por lo tanto, en el año 2030, con una producción de 125,000 ($\cong 130,000$) vehículos anuales, se obtendría una reducción del precio del vehículo de 8250 € por la celda de combustible, y de 1000 € por los depósitos de hidrógeno. La reducción total del precio sería de 9250 €, que, considerando un precio medio del vehículo del 70,000 €, representaría una reducción del precio del 13%. Atendiendo al coste total de propiedad, este porcentaje es mayor cuando se pasa a 200,000 unidades (18%), lo que se puede observar en la Figura 40. De todas formas, cabe destacar que en estudio de la Figura 40 se han considerado también reducciones de precio provenientes de no sólo la celda y los depósitos, sino del resto de piezas de los vehículos, afectadas por la mayor economía de escala.

Total cost of ownership
USD cents/km

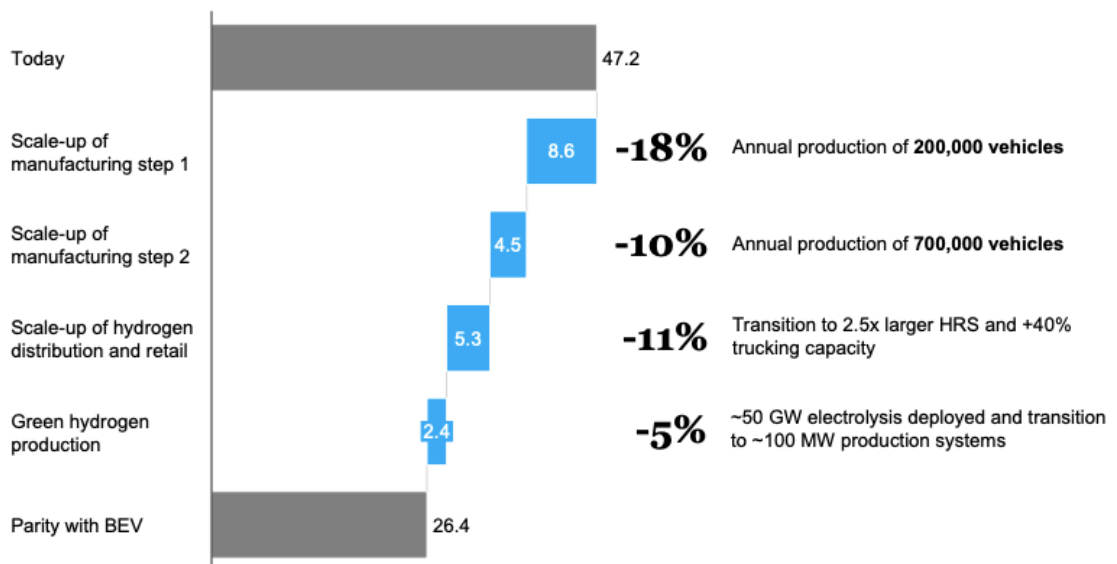


Figura 41. Coste total de propiedad de los vehículos de hidrógeno frente al de los vehículos 100 % eléctricos

En cuanto a la reducción de precios correspondiente a la electrólisis y a la mayor capacidad y eficiencia de los métodos de transporte y distribución, se ha demostrado que antes del 2030 se puede obtener este porcentaje de reducción. Por lo tanto, la única reducción por la que habría que esperar más años, sería la del 10 % correspondiente a la producción de 700,000 vehículos, pero en todo caso no representa una diferencia tan determinante. Por lo tanto, se puede concluir que el coste total de propiedad de los vehículos de hidrógeno sólo sería un 15% mayor en el 2030. Lo normal sería que, para el 2035, los costes de venta de los vehículos de hidrógeno sean iguales a los de los puramente eléctricos. En la Figura 41 se puede observar la paridad de costes de fabricación de ambos tipos de vehículos en el 2035, en una escala normalizada.

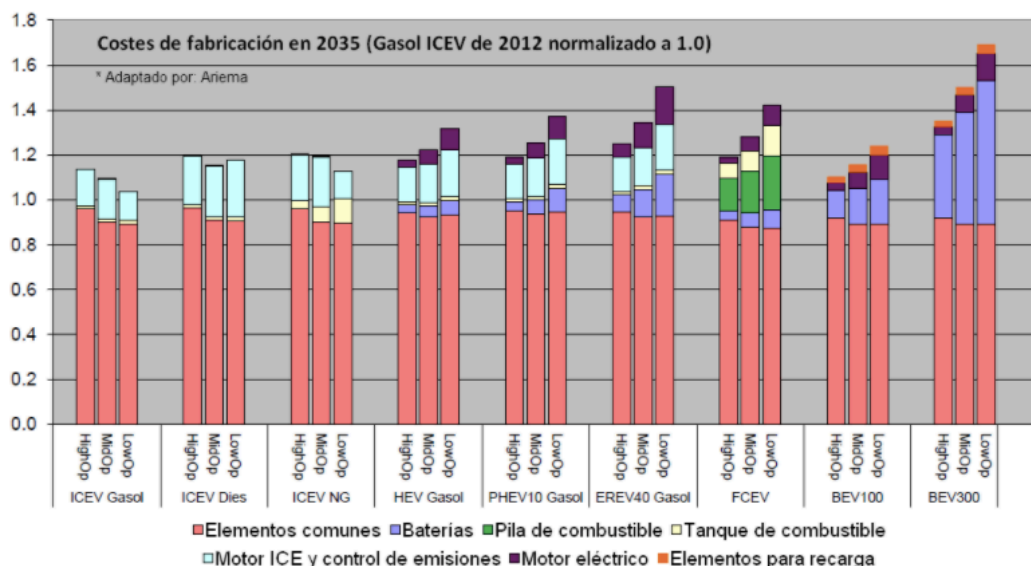


Figura 42. Costes de fabricación en una escala normalizada [63]

6.3 Futuro precio de los vehículos eléctricos

Como se puede observar en la comparativa del apartado 5.8, aunque de media los vehículos eléctricos sean 6000 € más caros que sus equivalentes de combustión, los modelos de los últimos años presentan reducciones de precio importantes, pudiéndose acercar al precio de compra de estos [64]. En el ejemplo de los coches Volkswagen, por

ejemplo, se puede apreciar como el precio del coche eléctrico presentaba una diferencia de 5000 € respecto al de gasolina, y de sólo 232 € con respecto al diésel. Esta diferencia viene principalmente determinada por el coste de la batería. Sin embargo, los precios de estas han disminuido en gran medida en los últimos años, y varios estudios afirman que, en cuestión de tres años, el precio de los vehículos eléctricos se igualará al de los convencionales. A continuación, se tratará de estimar la reducción del precio de la batería eléctrica elaborando un modelo que permita predecir la evolución de su precio.

Para ello, un estudio realizado por Bloomberg NEF servirá como base de datos para el análisis [65]. A continuación, se muestra la evolución del precio de las baterías eléctricas a nivel mundial en los últimos 8 años, según el propio estudio.

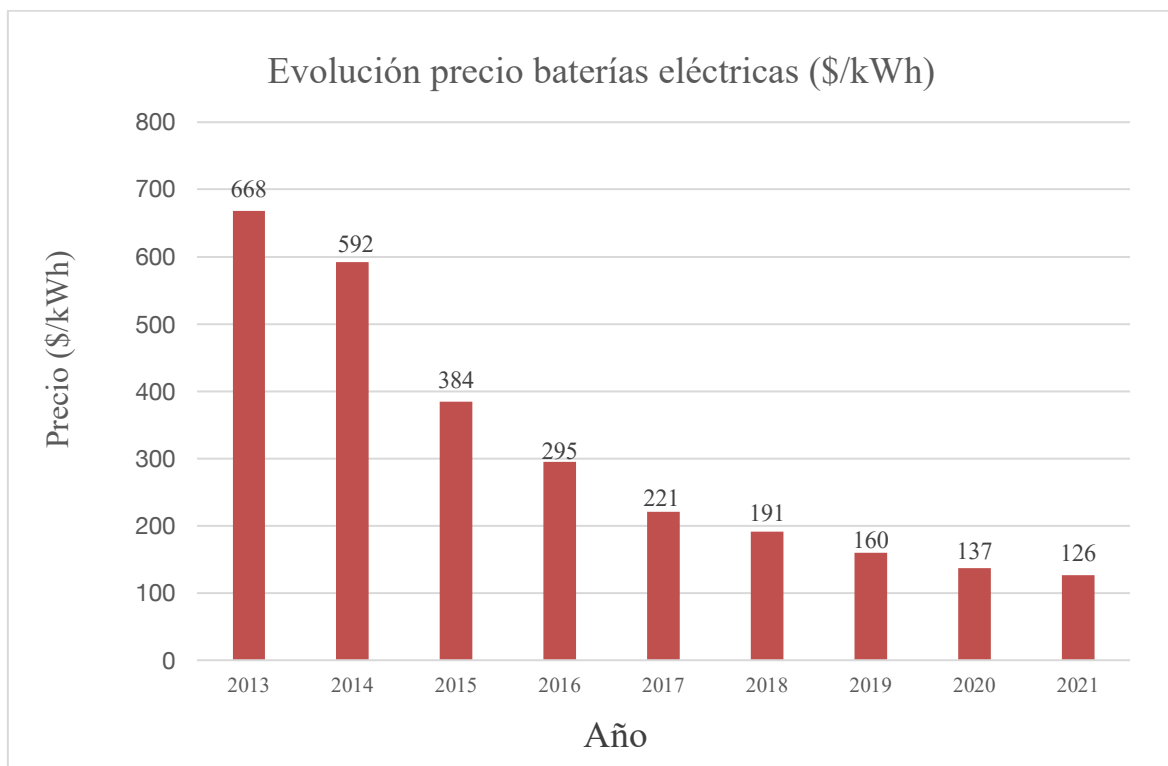


Figura 43. Evolución del precio de las baterías eléctricas a nivel mundial, desde el año 2013 al 2021, con el precio indicado en dólares [65]

Se observa que, aunque el precio de las baterías disminuye paulatinamente con los años, también disminuye el porcentaje de reducción en el que lo hace. Es decir, cada

año disminuye menos porcentualmente el precio respecto al año anterior. Por ejemplo, del año 2016 al 2017 se redujo en mayor cantidad el precio de las baterías (en términos porcentuales y absolutos) que en el intervalo de 2018 a 2019, en concreto un 25% frente a un 13,5%. A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a la disminución anual del precio absoluta y relativa.

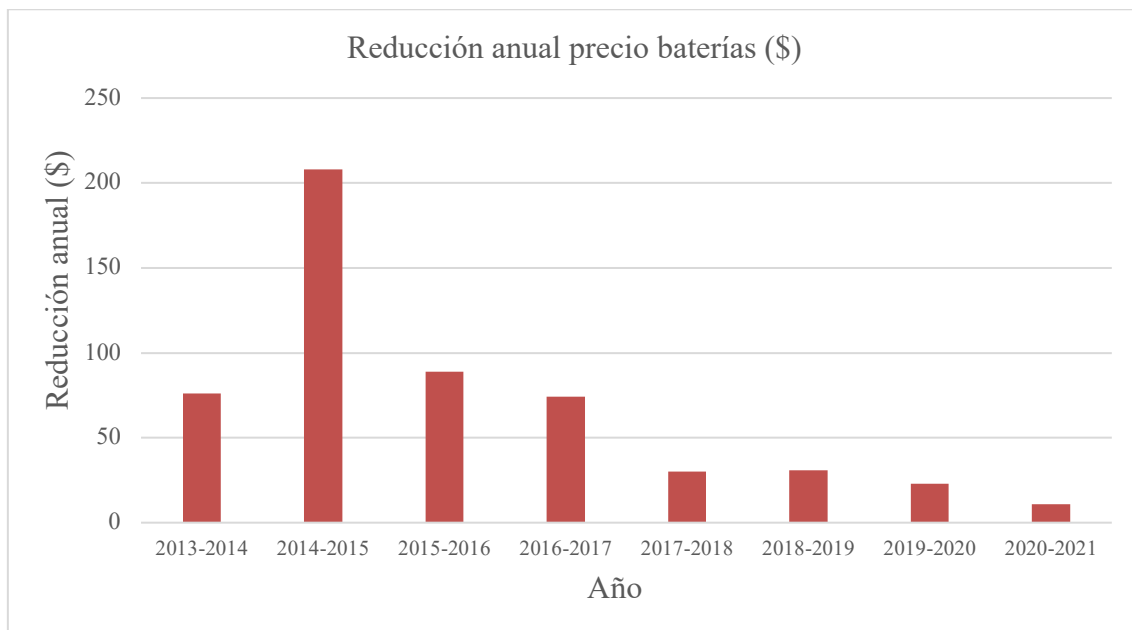


Figura 44. Reducción anual en valor absoluto del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas. Precio dado en dólares.

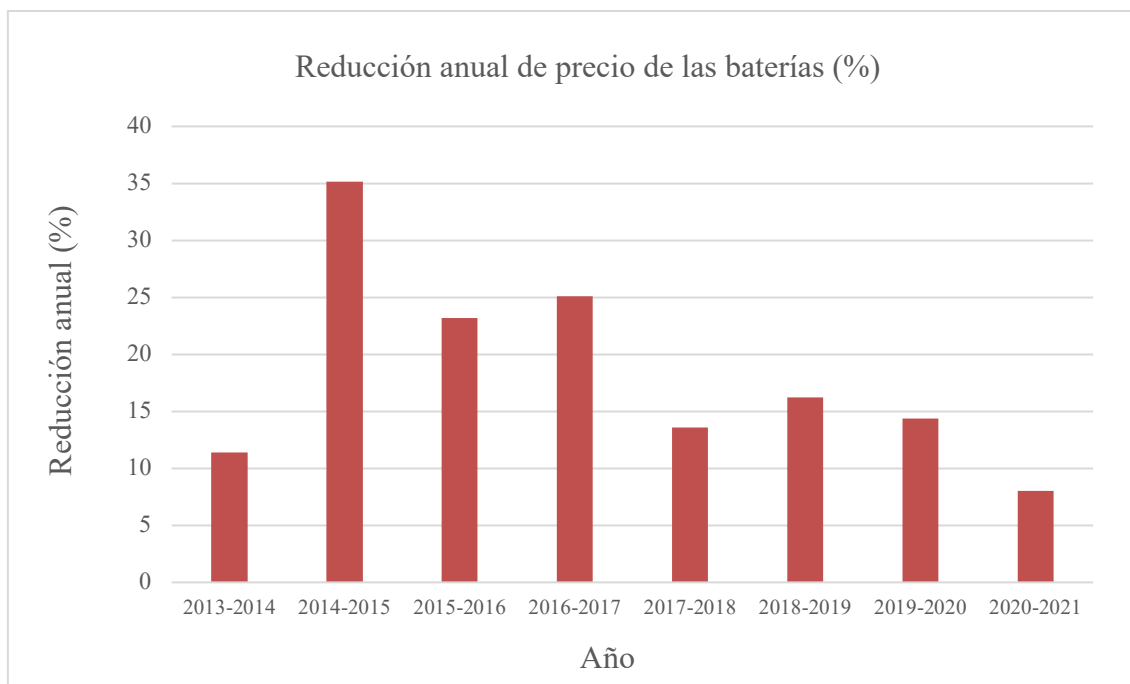


Figura 45. Reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas.

En la Figura 44, se puede observar como el porcentaje de reducción del precio por kWh de las baterías muestra más estabilidad en los cuatro últimos años, es decir, a partir de 2017. Aunque el porcentaje de reducción del último año haya sido más bajo de lo normal, varias empresas apuntan que el impacto de la pandemia no ha permitido hacer todos los progresos que se esperaban [66]. A partir de estos datos, se puede establecer una predicción de la evolución del precio en el futuro. La gráfica de la estimación se muestra a continuación.

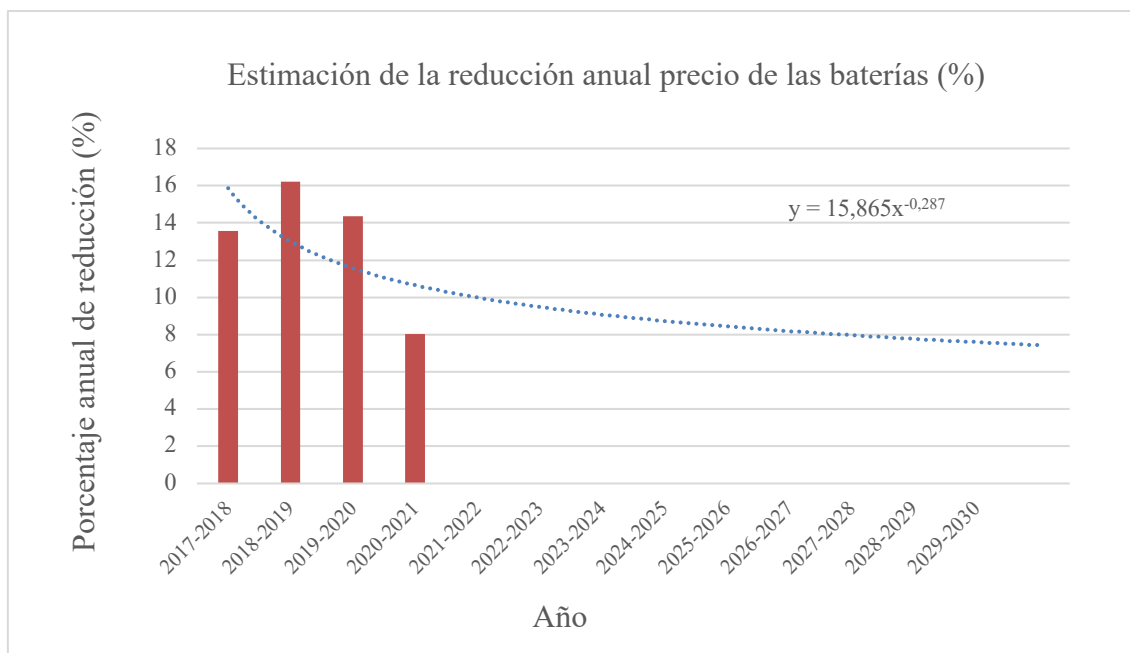


Figura 46. Estimación de la reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas, en los próximos 10 años.

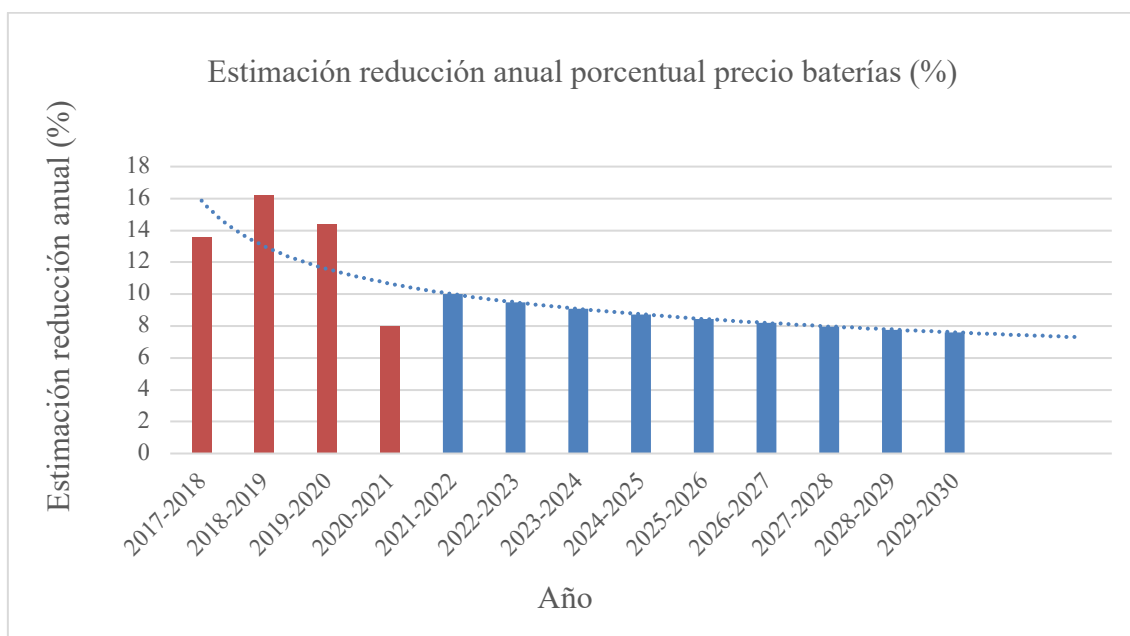


Figura 47. Estimación de la reducción anual porcentual del precio por kWh de capacidad de las baterías eléctricas, en los próximos 10 años.

Con la función estimada, se puede predecir el futuro valor de la reducción anual porcentual del precio por kWh de las baterías, obteniendo:

$$\text{precio}/\text{kWh}_{\text{baterías}} = (100 - (\%) \text{ reducción}_{\text{anual}}) \cdot \text{precio}_{\text{año_anterior}}$$

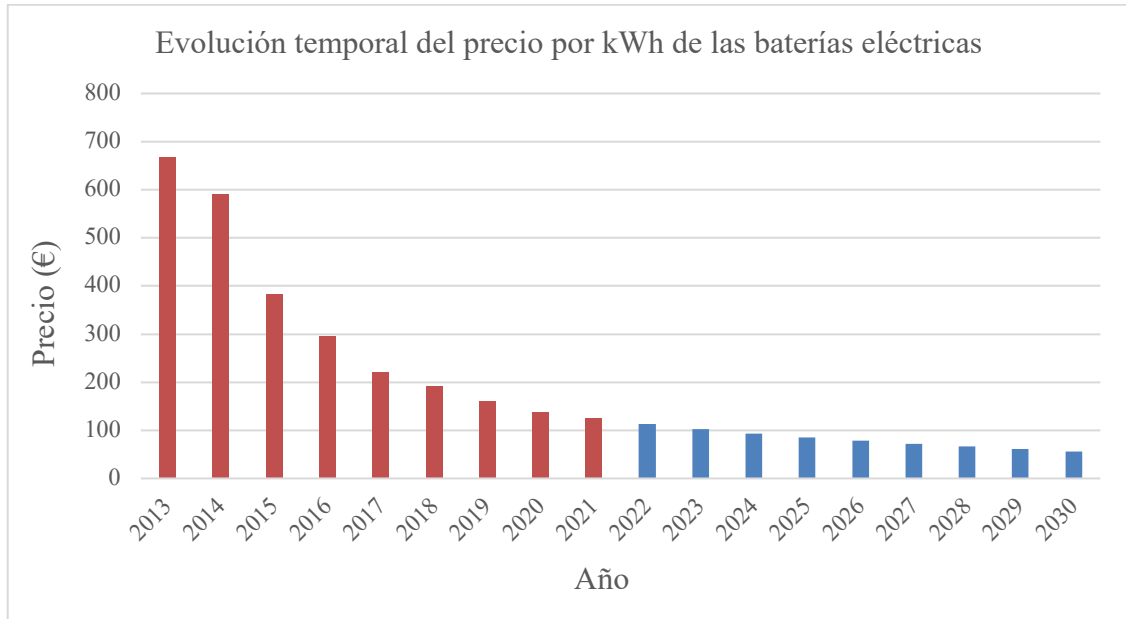


Figura 48. Evolución y estimación del precio de las baterías eléctricas a nivel mundial, desde el año 2013 al 2030, con el precio indicado en dólares.

Según Bloomberg, el precio por kWh de las baterías eléctricas a partir del cual, de manera aproximada, será posible fabricar vehículos eléctricos al mismo precio que los de combustión interna, es de 100 \$/kWh. Atendiendo a la Figura 47, el precio de las baterías eléctricas por kWh alcanzará este valor dentro de dos o tres años. Por lo tanto, en poco tiempo se podrá eliminar la barrera principal que impide un mayor número de ventas de los vehículos eléctricos en el país: el precio. Cabe destacar que en la afirmación de que el precio de las baterías a partir del cual se obtiene paridad de precio con los vehículos de combustión es de 100 \$/kWh, se ha considerado una batería actual de tamaño 35 kWh. Para baterías más grandes, el tiempo sería de dos o tres años adicionales [67]. Aún así, la reducción de costes es drástica para cualquier tamaño de batería. Por ejemplo, el precio de las baterías en el 2030, considerando una capacidad media de 90 kWh (atendiendo a la evolución de la autonomía media estimada en el apartado 5.1), y que el precio estas

será de 56 \$/kWh, sería de 5,040 \$, frente al de 11,340 \$ que valdría una batería de la misma capacidad en el 2021.

6.4 Futuro de la infraestructura de carga de los vehículos de hidrógeno

El gobierno español, mediante la Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable, pretende instalar entre 100 y 150 hidrogeneras de acceso público en el país antes del 2030. Como se pretende que haya entre 5000 y 7500 vehículos de pila de combustible en el parque automovilístico para ese mismo año, el número de vehículos de hidrógeno por hidrogenera no sería excesivamente alto (comparándolo con las gasolineras, por ejemplo). Sin embargo, el problema reside en la indisponibilidad y escasez de puntos, de la misma manera que con los vehículos eléctricos, pero de manera mucho más acentuada [9].

Es decir, 150 puntos de carga (en el mejor de los casos), serían insuficientes para satisfacer plenamente las necesidades de los conductores de estos vehículos. Si la máxima distancia entre hidrogenera es de 250 km, un conductor podría encontrarse en el caso de tener que recorrer 125 km para poder repostar. Aún así, algunas empresas privadas están desarrollando planes y tomando la iniciativa de comenzar a construir hidrogeneras. La Figura 48 pretende ilustrar el plan que la energética Naturgy quiere llevar a cabo en el país para el 2025. Este consiste en la construcción de 38 hidrogeneras (en algunas de las cuales también se produce H_2), apoyada económicamente por el gobierno. Este sería un impulso importante en el desarrollo de la infraestructura de recarga necesaria para el correcto desarrollo del hidrógeno en el sector automovilístico. Además, en la figura también se muestran los potenciales puntos de producción de hidrógeno verde en el país.



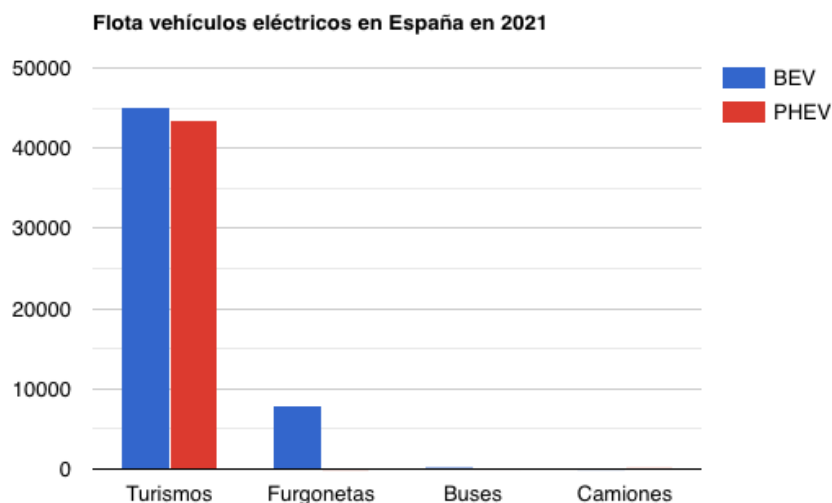
Figura 49. Mapa de hidrogeneras en el país para el 2025 [68]

Así mismo, el plan pretende introducir entre 150 y 200 autobuses de pila de combustible de hidrógeno renovable antes del 2030. La intención es que estos autobuses se utilicen principalmente en entornos urbanos, y en concreto en ciudades de más de 100,000 habitantes. Debido a que estos vehículos trabajan en circuitos cerrados y en jornadas intensivas, la transición hacia la pila de combustible sí podría ser una alternativa eficaz, desde luego más que en los vehículos privados. Si hay algún punto de repostaje situado cerca de la ruta habitual de estos vehículos (que, al ser en un entorno urbano, sería probable), esta se podría presentar como una opción idónea para la incursión y normalización del hidrógeno en la movilidad, ayudando a la transición hacia una movilidad más sostenible. El reducido tiempo de repostaje y la mayor autonomía que ofrece esta tecnología, pueden ser factores claves para sustituir a la electrificación como alternativa para descarbonizar este tipo de actividades [69].

6.5 Futuro de la infraestructura de recarga de los vehículos eléctricos

La evolución de la infraestructura de recarga, aunque sea también escasa en el caso de los vehículos eléctricos, está mucho más desarrollada que la de hidrogenas. El gobierno pretende dar el impulso necesario que los vehículos eléctricos necesitan para su correcta incursión en el parque automovilístico nacional. Para cumplir con el Acuerdo de París y ofrecer un transporte totalmente neutro en emisiones en 2050, son varios organismos los que han hecho los cálculos.

La ya mencionada asociación española ANFAC, ha estimado que España necesitaría 110,000 puntos de recarga en 2025, y 340,000 en 2030. La federación ecologista Transport&Environment (T&E), por su parte, ha calculado que España necesitaría 16,000 estaciones en 2021, 128,000 en 2025, y 307,000 en 2030, mientras que actualmente en el país hay 45,000 BEVs, como se puede deducir de la Figura 49. Además, a efectos de calcular el número de postes de carga que hay y que habrá por vehículo eléctrico, no se considerarán los híbridos no enchufables, puesto que como su propio nombre indica, no necesitan conectarse a los puntos de carga para recargar la reducida capacidad de su batería. Mientras que las intenciones del país son de contar con una cantidad de 250,000 vehículos eléctricos para 2023, para llegar a 5 millones en 2030, la Federación Europea de Transporte y medio Ambiente (T&E) estima cifras algo inferiores (pero que siguen siendo ambiciosas para la actual cuota de ventas de vehículos eléctricos en el mercado español). La organización estima, por lo tanto, un parque de coches eléctricos de 1,165,000 en 2025, y de 3,765,000 en 2030, para lo que se necesitarían 128,000 puntos de recarga en 2025, y 307,000 en 2030.



(Fuente: EAFO)

Figura 50. Número de vehículos puramente eléctricos e híbridos enchufables en abril de 2021 [10]

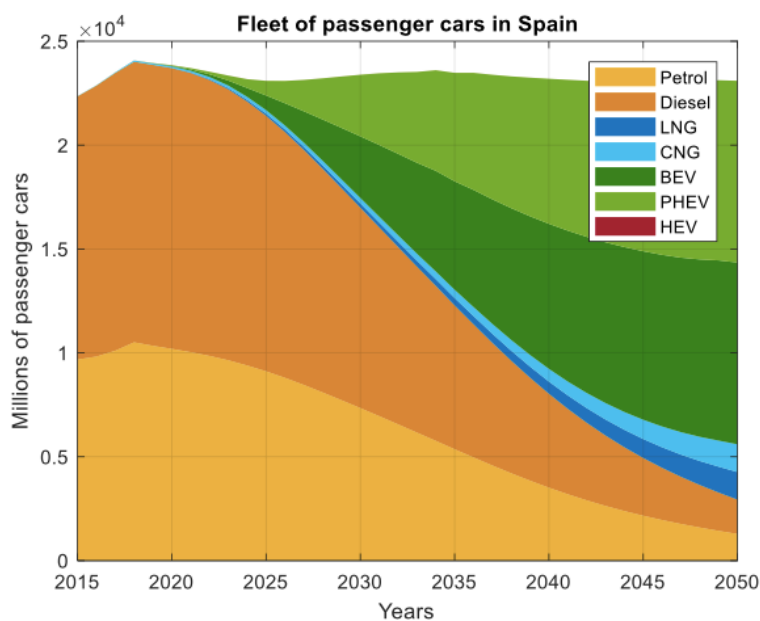


Figura 51. Evolución del número de turismos del parque automovilístico español para las diferentes tipologías de vehículos [10]

Como se puede observar en la Figura 50, la evolución de los vehículos híbridos enchufables y los vehículos eléctricos puros es muy parecida. Mientras que en los primeros años los PHEV adquieren un poco más de cuota de mercado, la tendencia de ambos tipos de vehículos se iguala con los años. Por lo tanto, a efectos prácticos se

considerará que el porcentaje de híbridos enchufables sobre el total de vehículos es igual al de los puramente eléctricos. La información del número de vehículos de cada tipo, por lo tanto, se resume en la Tabla 22 [10].

	BEV	PHEV	Total EVs
2021	53.000	43.500	96.500
2025	1.165.000	1.165.000	2.330.000
2030	3.765.000	3.765.000	7.530.000

Tabla 22. Número de EV y PHEV en diferentes años.

En la Tabla 23 se procede a elaborar una media de los datos ofrecidos por ambos organismos mencionados anteriormente, con el fin de obtener datos fundamentados que puedan ser útiles para los siguientes cálculos.

	Puntos de recarga necesarios		
	ANFAC	T&E	Media
2025	110.000	128.000	119.000
2030	340.000	307.000	323.500

Tabla 23. Estimación del número de puntos de carga necesarios en España en la próxima década, según diferentes fuentes [70],

Para calcular el número de EV totales por punto de carga, se puede recurrir a la siguiente fórmula:

$$n^{\circ} \text{ EV} / \text{punto}_{\text{carga}} = \frac{n^{\circ} \text{ EV}}{n^{\circ} \text{ pto}_{\text{s carga}}}$$

	Nº de EV totales	Nº de puntos de carga	Nº de EV totales por punto de carga
2021	96.500	8.545	11,3
2025	1.165.000	119.000	9,8
2030	3.765.000	323.500	11,6

Tabla 24. Cálculo del número de vehículos eléctricos por puntos de carga necesarios en España en la próxima década, según diferentes fuentes.

En la Tabla 24, se observa que, al contrario de lo que se podría pensar, el número de puntos de carga por vehículo no es el problema de la infraestructura de carga de coches eléctricos en la actualidad. De hecho, España se encuentra actualmente por debajo de la media europea en este índice (11,3 de España frente a 12,5 de Europa), es decir, hay más puntos de recarga por vehículo eléctrico que la media europea, lo cual es bueno. Hay potencias como Noruega o Alemania, que, aunque su red de recarga está mucho más desarrollada que la española (lo que se puede corroborar con el mencionado barómetro de la electromovilidad), presentan de media un número de vehículos eléctricos por puesto de recarga de 24 y 13 respectivamente, lo que demuestra que éste no es el inconveniente.

El problema reside entonces en la indisponibilidad y escasez de puntos. Esto es, aunque en las ciudades la densidad de puntos de carga sea alta, el principal problema se encuentra en los viajes de carretera, puesto que todavía hay extensiones de hasta 100 km² sin puntos donde poder recargar el vehículo, como se ilustra en la Figura 51. De hecho, actualmente la distribución de puntos de carga es de 5,451 puntos de uso público en las urbes, frente a 3,094 en las carreteras, y varios puntos tienen un uso es demasiado bajo para amortizarlos. Puesto que hay pocos vehículos eléctricos en el parque, algunos de los puntos no tienen la demanda que se requeriría, y su actividad todavía no es beneficiosa, por lo que se trata de un problema recíproco. Es decir, es probable que si hubiese más

puntos de recarga en carretera, se comprasen más coches eléctricos, y si hubiese más coches eléctricos, las empresas se interesarían en instalar puntos de carga en carretera, puesto que habría demanda para ellos y por ende beneficio económico.

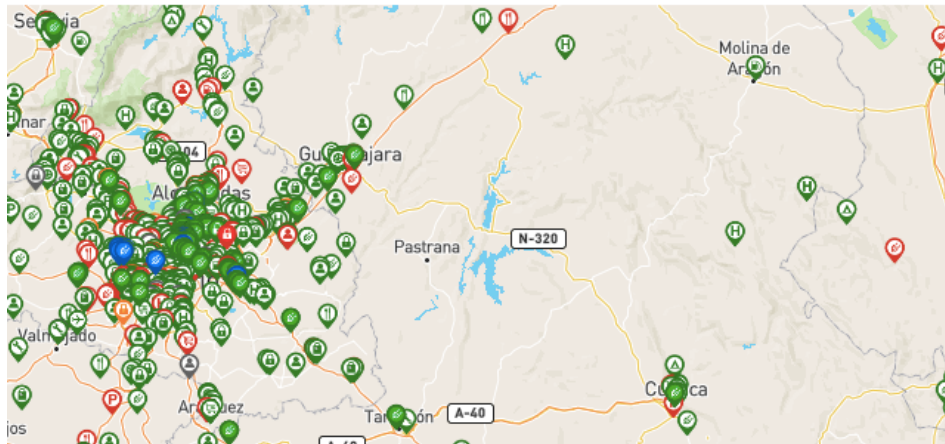


Figura 52. Puntos de recarga de vehículos eléctricos en una zona de España [71]

7 RESULTADOS

El presente capítulo pretende resumir los resultados obtenidos, con la finalidad de ayudar a deducir las conclusiones. Se presentarán los resultados en el orden en el que se han ido plasmando a lo largo del trabajo.

- La reducida densidad energética volumétrica del hidrógeno provoca el requerimiento de grandes volúmenes para su almacenamiento, que, en el caso de la movilidad, serían insostenibles. En concreto, la densidad del hidrógeno a temperatura y presión ambiente es de 8000 veces inferior a la de la gasolina.
- Por lo tanto, para almacenarlo en los vehículos, se presuriza o licua para aumentar su densidad energética volumétrica, disminuyendo así el requerimiento de espacio.
- La autonomía media real de los vehículos 100 % eléctricos es de 290 km.
- Las autonomías medias y máximas reales de estos, serán de 510 km y 1000 km respectivamente en el 2030.
- Actualmente, los costes asociados a la electrólisis son, aproximadamente, 4 veces superiores a los métodos de reformado.
- Se estima que la paridad de precios entre ambos métodos llegará en el 2030, debido principalmente a la disminución del principal contribuyente a los costes de la electrólisis: la electricidad.
- Precios de electricidad de 0,025 €/kWh son necesarios para lograr esta paridad, frente al precio medio actual de 0,12 €/kWh.
- Esta bajada de precios dependerá del porcentaje de generación renovable en el país, pues es esta la que oferta a precios más bajos.
- Además, también dependerá de la cantidad de excedentes energéticos de estas tecnologías. Cuantos más excedentes, más se podría emplear en generar hidrógeno verde a precios bajos.

- Considerando el ciclo de vida de un vehículo, los costes totales de los vehículos de combustión pueden ser iguales o superiores a los de los vehículos eléctricos en cuestión de 7 años, lo que depende principalmente del tipo de carga efectuada y del kilometraje.
- En los casos en el que los BEVs se recarguen en horas valle, sólo 5 años son necesarios para lograr esta paridad de precios.
- Para lograr la paridad de precios de compra entre los vehículos de combustión convencionales y los 100 % eléctricos, se estima que se necesita un coste por kWh de la batería eléctrica de 100 €/kWh, el cual se alcanzará entre 2023 y 2024.
- Los costes totales del vehículo de hidrógeno sólo serán un 10% mayores a los de los vehículos eléctricos en 2030, y se prevé su paridad de precios en el 2035.
- El precio de las celdas de combustible de hidrógeno pasará de valer 140 €/kW en la actualidad, a 50 €/kWh en 2031, lo que implica una reducción de 8250 € en el precio total del vehículo procedente únicamente de este componente.
- El coste de los depósitos (para almacenar 5 kg de H₂, equivalente a 560 km de autonomía), disminuirá en 1000 € para el 2030.
- Se pretende que el número de puntos de recarga de vehículos eléctricos se multiplique por un factor de 38 para el 2030, pasando de 8,000 puntos de carga a 323,000.
- Los planes para la infraestructura de hidrogeneras en el país, sin embargo, son de instalar únicamente 150 puntos de recarga para el 2030.
- Actualmente, la infraestructura de puntos de recarga de vehículos eléctricos es insuficiente, y prácticamente nula para los vehículos de hidrógeno.

8 CONCLUSIONES

- El hidrógeno, en general, tiene un elevado potencial en el sector transportes.
- No sólo en el transporte terrestre, sino para descarbonizar líneas de tren no electrificadas, barcos, y con menos eficacia, aviones, el hidrógeno se introducirá en varias de las diferentes alternativas en la movilidad.
- Además, también podrá servir para descarbonizar otras industrias, como la generación de calor doméstica e industrial, o el sector eléctrico, permitiendo reducir la dependencia energética que España tiene de otros países. Algunas de las importaciones que se podrán reducir son las de combustibles fósiles o gas.
- En el sector eléctrico, el hidrógeno podría emplearse como vector energético, es decir, ser producido en situaciones de excedentes de generación eléctrica, y generar electricidad a partir de él en casos de necesidad, facilitando la gestión de la demanda.
- En la movilidad, las mejores características técnicas de los FCEVs frente a los BEVs (menor tiempo de recarga y mayor autonomía), hubiese permitido el desarrollo a gran escala de los vehículos de hidrógeno en el país, en caso de haberse cumplido algunas premisas.
- Algunas de ellas son: el abaratamiento de los costes de los métodos de producción de hidrógeno verde, de los precios de compra de los vehículos y de repostaje y, sobre todo, el desarrollo infraestructura de recarga en el país. Sin embargo, a diferencia de otras naciones, hasta ahora estas premisas no se han cumplido en España.
- La inversión, por el contrario, se ha focalizado en los vehículos eléctricos, lo cuál ha facilitado su mejor desarrollo, permitiendo una mejor infraestructura de recarga, así como unos precios más bajos.
- Aún así, algunas de estas premisas sí se cumplirán en los próximos años. Por ejemplo, la bajada del precio de la electrólisis será un factor clave para la correcta incursión de estos vehículos en el parque automovilístico, y para el desarrollo general del hidrógeno como vector energético.

- En cuanto al precio del vehículo, también se ha demostrado que el año al partir del cual prácticamente habrá paridad de precio con los eléctricos es el 2030, premisa que se cumplirá a nivel global.
- Sin embargo, la principal diferencia entre España y otros países es el desarrollo de la infraestructura de recarga, para la cual no se esperan grandes avances, al contrario que los otros dos factores mencionados.
- Mientras que naciones como Alemania y EEUU tienen un detallado plan para desarrollar la infraestructura necesaria (y de hecho ya cuentan con un buen número de hidrogeneras), España presenta un plan muy poco ambicioso.
- Si los 8500 puntos de recarga de vehículos eléctricos existentes en el país son insuficientes, las 150 hidrogeneras que se pretenden implantar lo son todavía más.
- De hecho, la distancia entre estas puede llegar a ser de 250 km, lo que revela un importante problema de indisponibilidad a medio plazo de puntos de recarga.
- En el largo plazo (es decir, más allá del 2030) los vehículos electrificados adquirirán una importante cuota de mercado, mientras que los de hidrógeno podrán empezar a aumentar su número de ventas.
- Con los precios de las electrólisis equiparables a los del reformado, y los precios de compra de los vehículos equiparables a los eléctricos entre el 2030 y 2035, el futuro de los vehículos de hidrógeno en el país dependerá del desarrollo de infraestructura de recarga que se realice.
- Sin una correcta infraestructura de recarga, es muy difícil que una nueva alternativa de vehículo se expanda eficientemente, como se está viendo con los BEVs.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Vehículos de hidrógeno: cómo funcionan, pros y contras | Luz en Ámbar». <https://www.cnae.com/blog/index.php/vehiculos-hidrogeno-funcionan-pros-contras/> (accedido jun. 24, 2021).
- [2] «Los planes de España y Europa para acabar con los vehículos de gasolina y diésel». <https://www.xataka.com/vehiculos/planes-espana-europa-para-acabar-vehiculos-gasolina-diesel> (accedido jun. 29, 2021).
- [3] «Baterías de litio de los coches eléctricos: un problema de reciclaje y contaminación Autocasión». <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/baterias-litio-coche-electrico-contaminacion-reciclaje> (accedido jun. 29, 2021).
- [4] «Paraíso para el coche de hidrógeno: Corea del Sur construirá 450 “hidrogeneras” - Motor.es». <https://www.motor.es/noticias/corea-puntos-repostaje-hidrogeno-202175529.html> (accedido jun. 29, 2021).
- [5] «¿Qué es una hidrogenera y cuántas tenemos en España? - Good New Energy». <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/que-es-una-hidrogena-y-cuantas-tenemos-en-espana/> (accedido jun. 29, 2021).
- [6] «Tecnologías para la producción de hidrógeno». <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno14/hidrog/tecnologias.htm> (accedido jun. 29, 2021).
- [7] «Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf». Accedido: jun. 29, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf>
- [8] «The Future of Hydrogen.pdf». Accedido: jun. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- [9] «Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable.pdf».
- [10] «Observatorio del Vehículo Eléctrico y Movilidad Sostenible – DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS – IIT».

- <https://evobservatory.iit.comillas.edu/> (accedido jun. 24, 2021).
- [11] «LIBRO HIDROGENO_Fundación Naturgy.pdf».
- [12] «Almacenamiento de H2 | H2chile». <https://www.h2chile.cl/copia-de-produccion-del-h2> (accedido jun. 15, 2021).
- [13] C. F.-B. Badía, «2.4 Propiedades del Hidrógeno», p. 9.
- [14] C. F.-B. Badía, «4. Barreras para la Introducción del Hidrógeno», p. 16.
- [15] O. Santiago, «¿Es el hidrógeno peligroso?», Apilados, ago. 12, 2018. <http://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/> (accedido jun. 15, 2021).
- [16] O. Santiago, «El hidrógeno como gas real. Factor de compresibilidad», Apilados, oct. 08, 2017. <http://apilados.com/blog/el-hidrogeno-como-gas-real-factor-de-compresibilidad/> (accedido jun. 15, 2021).
- [17] E. Tzimas y Europäische Kommission, Eds., Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [18] «BMW - Cryo Compressed Hydrogen Storage». Accedido: jun. 17, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://stfc.ukri.org/stfc/cache/file/F45B669C-73BF-495B-B843DCDF50E8B5A5.pdf>
- [19] O. Santiago, «Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques», Apilados, oct. 22, 2017. <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (accedido jun. 17, 2021).
- [20] «Maletero de coche | Características, detalles | Los maleteros más grandes», Todas las noticias de coches en un solo portal: Pruebas, fotos, vídeos, informes..., feb. 21, 2020. <https://noticias.coches.com/consejos/maletero-coche/373291> (accedido jun. 18, 2021).
- [21] «toyota-mirai-dpl-es.pdf».
- [22] «Propiedades del GLP - REPSOL». Accedido: jun. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.repsol.pe/imagenes/repsolporpe/es/2GLP_tcm76-84132.pdf
- [23] «Gasolina 95 Cepsa.pdf». Accedido: jun. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Lubricantes/FICHA_OPTIMA_GAS_95.pdf
- [24] A. G. García-Conde, «La economía del Hidrógeno», p. 19.

- [25] «Iniciación a la química». Accedido: jun. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://aula44.files.wordpress.com/2009/07/03-cantidad-en-que3admica-resueltos1.pdf>
- [26] A. P. Priego, «Producción de Hidrógeno», p. 18, 2009.
- [27] A. G. García-Conde, «Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno», p. 16.
- [28] «Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal», p. 106.
- [29] «Aplicaciones del H2», H2chile. <https://www.h2chile.cl/copia-de-almacenamiento-de-h2-1> (accedido jun. 21, 2021).
- [30] D. Welle (www.dw.com), «Gases de efecto invernadero: cómo bajarlos a cero | DW | 03.12.2014», DW.COM. <https://www.dw.com/es/gases-de-efecto-invernadero-c%C3%B3mo-bajarlos-a-cero/a-18108475> (accedido jun. 23, 2021).
- [31] «Fundamentos de los coches de hidrógeno | BMW.com». <https://www.bmw.com/es/innovation/coches-de-hidrogeno-asi-funcionan.html> (accedido jun. 24, 2021).
- [32] «Tipos de pilas de combustible y su clasificación | Apilados». <http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/> (accedido jun. 24, 2021).
- [33] «Hyundai ha desarrollado un nuevo sistema para purificar el aire del coche contra bacterias, moho y contaminación». <https://www.motorpasion.com/tecnologia/hyundai-ha-desarrollado-nuevo-sistema-para-purificar-aire-coche-bacterias-moho-contaminacion> (accedido jun. 24, 2021).
- [34] «Diferencia entre motor síncrono y asíncrono». <https://illustrationprize.com/es/77-difference-between-synchronous-and-asynchronous-motor.html> (accedido jun. 24, 2021).
- [35] «El funcionamiento de un motor de combustión, paso a paso y en vídeo». <https://www.motorpasion.com/revision/funcionamiento-motor-combustion-paso-a-paso-video> (accedido jun. 24, 2021).
- [36] «GNV.pdf».
- [37] «GLP.pdf».

- [38] «Tipos de coche eléctrico: estos son los modelos que puedes encontrar -- Coche eléctrico -- Autobild.es». <https://www.autobild.es/practicos/tipos-coche-electrico-estos-son-modelos-puedes-encontrar-497109> (accedido jun. 24, 2021).
- [39] «The ICE age is over: Why battery cars will beat hybrids and fuel cells». <https://thedriven.io/2018/11/14/the-ice-age-is-over-why-battery-cars-will-beat-hybrids-and-fuel-cells/> (accedido jun. 24, 2021).
- [40] «5 mejores coches de hidrógeno en 2021 -- Coche eléctrico -- Autobild.es». <https://www.autobild.es/listas/5-mejores-coches-hidrogeno-2021-819099> (accedido jun. 24, 2021).
- [41] «The Median Range Of Fully Electric Vehicles Exceeded 250 Miles In 2020». <https://insideevs.com/news/464449/median-range-evs-2020-exceeded-250-miles/> (accedido jun. 24, 2021).
- [42] «Moving hydrogen from hype to hope | Transport & Environment». <https://www.transportenvironment.org/newsroom/blog/moving-hydrogen-hype-hope> (accedido jun. 24, 2021).
- [43] B. Services, «Claves de la conducción eficiente en un híbrido eléctrico», Motorpasión, jun. 17, 2021. <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/claves-conduccion-eficiente-hibrido-electrico> (accedido jun. 24, 2021).
- [44] «Diésel o gasolina: ¿qué comprar?». <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/diesel-o-gasolina-que-debes-compar> (accedido jun. 24, 2021).
- [45] «4.2. La eficiencia energética del vehículo eléctrico | Energía y Sociedad». <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/> (accedido jun. 24, 2021).
- [46] «OMIE». <https://www.omie.es/> (accedido jun. 24, 2021).
- [47] «PNIEC.pdf».
- [48] «Mapa de estaciones de gas natural - Gasnam». <https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-estaciones-de-gas-natural/> (accedido jun. 24, 2021).
- [49] «Agencia Europea de Medio Ambiente — Agencia Europea de Medio Ambiente». <https://www.eea.europa.eu/es> (accedido jun. 24, 2021).

- [50] «Factor de emisión». <http://palido.deluz.mx/articulos/1232> (accedido jun. 24, 2021).
- [51] «Medio ambiente | Unión Europea». https://europa.eu/european-union/topics/environment_es (accedido jun. 24, 2021).
- [52] «The Future of Hydrogen», p. 203.
- [53] «the-Future-of-Hydrogen @ Wwww.Iea.Org».
- [54] «201119-how-hydrogen-can-fuel-the-energy-transition-11740867 @ www.spglobal.com».
- [55] FCHEA, «Road Map to a US Hydrogen Economy. Reducing emissions and driving growth across the nation», p. 92, 2020.
- [56] «2066097 @ www.rtve.es».
- [57] «Assets Providing Flexibility Are Key To Maximizing The Role Of Renewable Energy In Spain And Chile _ BloombergNEF».
- [58] «95f9445208b2291ae358f96e2218e7437bd0fef1 @ elperiodicodelaenergia.com».
- [59] «fuel cell @ www.transportenvironment.org».
- [60] «188916 @ www.autofacil.es».
- [61] «NEXO».
- [62] «IHS_ fuel cell vehicle production of _ 70,000 annually by 2027; _0».
- [63] «ARIEMA – Hidrógeno y pilas de combustible». <http://www.ariema.com/> (accedido jun. 25, 2021).
- [64] «Coste de coche electrico, comparativa con gasolina». <https://www.xataka.com/automovil/merece-pena-coche-electrico-aqui-tenes-calculadora-para-comprobarlo-2> (accedido jun. 25, 2021).
- [65] «Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh | BloombergNEF». <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/> (accedido jun. 25, 2021).
- [66] «La automoción española ante la crisis del COVID-19 - KPMG Tendencias». <https://www.tendencias.kpmg.es/2020/03/automocion-espanola-covid-19/> (accedido

jun. 25, 2021).

[67] «Precio baterías de coches eléctricos».

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/baterias-coches-electricos-mas-baratas-60-dolares-kwh-nuevo-objetivo/20210430124309044737.html> (accedido jun. 25, 2021).

[68] «Mapa de Hidrogeneras en 2025». <https://www.motorpasion.com/coches-electricos/este-optimista-mapa-muestra-que-recorrer-espana-coche-electrico-hidrogeno-sera-posible-2025> (accedido jun. 25, 2021).

[69] «Mapa Hidrogeneras | Auto». <https://auto.cnh2.es/mapa-hidrogeneras/> (accedido jun. 26, 2021).

[70] «ANFAC Matriculaciones de vehículos electrificados».

<https://anfac.com/matriculaciones-vehiculos-electrificados/> (accedido jun. 25, 2021).

[71] «Listado de puntos de recarga en España».

<https://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/espana> (accedido jun. 26, 2021).