

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis comparativo de los vehículos de hidrógeno
y los vehículos eléctricos

Autor: Bruno Sala Saura

Tutor: Francisco Pino Lucena

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla. 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis comparativo de los vehículos de hidrógeno y los vehículos eléctricos

Autor:

Bruno Sala Saura

Tutor:

Francisco Pino Lucena

Profesor titular

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Análisis comparativo de los vehículos de hidrógeno y los vehículos eléctricos

Autor: Bruno Sala Saura

Tutor: Francisco Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis padres, María y Sergio, a mis hermanas, Claudia y Sofia, y a mis abuelos; Pepe, Gema y Nona por darme su apoyo y amor incondicional. Ellos han hecho que me supere y saque lo mejor de mí cada día y me han enseñado valores como el trabajo duro, esfuerzo y disciplina para conseguir lo que me proponga.

Gracias a mi círculo de amigos más cercano, a quienes considero mi segunda familia. Tanto a mis amigos de Barcelona por haberme aguantado y apoyado durante toda esta etapa de mi vida, como a los amigos que he hecho en Sevilla porque han hecho que mi experiencia en Sevilla haya resultado inmejorable.

Gracias a mi tutor, Francisco, por su trabajo y dedicación estos meses que sin lugar a duda ha sido fundamental para la consecución de este trabajo.

Bruno Sala Saura

Sevilla, 2022

El actual modelo energético está basado, principalmente, en energías fósiles y, por tanto, está basado en un recurso finito. Dicho modelo requiere de una transición hacia un modelo energético con predominancia de las energías renovables

Una de las industrias más consumidora de esos combustibles fósiles es la de la automoción y el transporte, es por ello por lo que los acuerdos globales de transición energética ponen especial atención en esta industria.

El objetivo de este trabajo de fin de grado es realizar un análisis de las tecnologías más prometedoras en el campo de la automoción: el hidrógeno y la electricidad. Por un lado, los vehículos de batería (BEV) hacen referencia al Modelo Eléctrico. Por otro lado, los vehículos de pilas de combustible de hidrógeno (FCEV) hacen referencia al Modelo de Hidrógeno. El trabajo se ha estructurado, en primer lugar, realizando una breve descripción de ambas tecnologías, así como de los elementos que las conforman y sus futuros desarrollos. Además, se realiza una evaluación del mercado de cada tipo de vehículo. En segundo lugar, se elabora un análisis comparativo de las principales características de ambas tecnologías. Y en tercer y último lugar, se formulan las correspondientes conclusiones y el trabajo concluye con líneas de trabajos futuros.

Abstract

The current energy model based mainly on fossil fuels, and therefore on a finite resource, requires a transition towards an energy model with a predominance of renewable energies.

One of the industries that consumes the most fossil fuels is the automotive and transport industry, which is why the global energy transition agreements pay special attention to this industry.

The aim of this thesis is to analyse the most promising technologies in the automotive field: hydrogen and electricity. On the one hand, battery-powered vehicles (BEV) refer to the Electric Model. On the other hand, hydrogen fuel cell vehicles (FCEV) refer to the Hydrogen Model, firstly with a brief description of both technologies, their constituent elements and future developments. In addition, an assessment of the market for each type of vehicle is made. Next, a comparative analysis of the main characteristics of both vehicle models is carried out. Finally, the corresponding conclusions are formulated to conclude with possible lines of future work

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1. <i>Emisiones</i>	1
1.2. <i>La electrificación automovilística</i>	4
2 Vehículos de hidrógeno	5
2.1. <i>Descripción</i>	5
2.2. <i>Mercado actual</i>	5
2.3. <i>Producción y distribución</i>	6
2.3.1. <i>Direcciones futuras</i>	10
2.4. <i>Almacenamiento</i>	11
2.4.1. <i>Direcciones futuras</i>	12
2.5. <i>Principio de funcionamiento y elementos característicos</i>	12
2.6. <i>Modelos en el mercado</i>	16
3 Vehículos eléctricos	19
3.1. <i>Descripción</i>	19
3.2. <i>Mercado actual</i>	19
3.3. <i>Producción y distribución</i>	20
3.3.1. <i>Direcciones futuras</i>	22
3.4. <i>Almacenamiento</i>	22
3.4.1. <i>Direcciones futuras</i>	24
3.5. <i>Principio de funcionamiento y elementos característicos</i>	25
3.6. <i>Modelos en el mercado</i>	32
4 Análisis Comparativo	35
4.1. <i>Puntos de recarga</i>	35
4.1.1. <i>Vehículos de hidrógeno</i>	35
4.1.2. <i>Vehículos eléctricos</i>	36
4.2. <i>Financiación</i>	38
4.2.1. <i>Vehículos de hidrógeno</i>	38
4.3. <i>Emisiones</i>	41
4.3.1. <i>Vehículos de hidrógeno</i>	41
4.3.2. <i>Vehículos eléctricos</i>	42

4.4.	<i>Autonomía</i>	44
4.4.1.	Vehículos de hidrógeno	44
4.4.2.	Vehículos eléctricos	44
4.5.	<i>Legislación</i>	45
4.5.1.	Vehículos de hidrógeno	45
4.5.2.	Vehículos eléctricos	46
5	Conclusiones	48
6	Referencias	50

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparativa del consumo energético: combustibles fósiles vs agua [3]</i>	6
<i>Tabla 2. Clasificación del hidrógeno según su producción y tecnología. [20]</i>	7
<i>Tabla 3. Ventajas y desventajas según la forma de almacenamiento (Elaboración propia)</i>	12
<i>Tabla 4. Clasificación pilas de combustible según electrolito (Elaboración propia)</i>	15
<i>Tabla 5. Especificaciones FCEV con mayor número de matriculaciones en España en el 2021 (Elaboración propia)</i>	16
<i>Tabla 6. Tipo de baterías según compuestos. (Elaboración Propia)</i>	24
<i>Tabla 7. Configuraciones más comunes motores eléctricos (Elaboración propia)</i>	30
<i>Tabla 8. Especificaciones BEV con mayor número de matriculaciones en España en el 2021 (Elaboración propia)</i>	33
<i>Tabla 9. Inversiones por tipos de medidas 2021-2030, M€. (Gobierno de España, 2020.)</i>	39
<i>Tabla 10. Inversiones por tipos de origen 2021-2030, M€. [39]</i>	40
<i>Tabla 11. Inversiones en redes de transporte, distribución e infraestructura de recarga, 2021-2030, M€. [39]</i>	40
<i>Tabla 12. Emisiones baterías BEV [10]</i>	43
<i>Tabla 13. Catálogo BEV con mayor autonomía (Elaboración propia)</i>	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Emisiones de CO ₂ originadas por el transporte [37]	1
Ilustración 2. Kilómetros recorridos por persona [42]	2
Ilustración 3. % Matriculaciones vehículos en 1r trimestre en la UE [1]	3
Ilustración 4. Ventas globales y participación el mercado de ventas de coches eléctricos 2010-2021. [29]	3
Ilustración 5. Métodos de producción del hidrógeno (Elaboración propia)	7
Ilustración 6. Proceso de reformado con vapor de agua [3]	8
Ilustración 7. Esquema de una celda electrolítica. [3]	9
Ilustración 8. Producción y distribución hidrógeno (Elaboración propia)	10
Ilustración 9. Evolución coste hidrógeno [48]	11
Ilustración 10. Componentes FCEV [13]	13
Ilustración 11. Principio de funcionamiento FCEV. [13]	14
Ilustración 8. Principio de funcionamiento FCEV. (Deloitte, s.f.)	14
Ilustración 13. Componentes pila de combustible. [3]	14
Ilustración 14. Inversiones en redes eléctricas en miles de MM €, 2020-2030 [44]	20
Ilustración 15. Estructura de la generación anual de la energía renovable peninsular 2020 [42]	20
Ilustración 16. Comparativa eficiencia ICE vs BEV [19]	21
Ilustración 17. Baterías modulares	25
Ilustración 18. Componentes BEV	26
Ilustración 19. Principio de funcionamiento BEV	26
Ilustración 20. Principio del campo magnético. [46]	28
Ilustración 21. Motor de flujo axial y flujo radial. [46]	29
Ilustración 22. Fundamento del rotor síncrono de reluctancia y par. [46]	29
Ilustración 23. Principio de funcionamiento motor sin escobillas de imanes permanentes. [46]	30
Ilustración 24. Montaje baterías BEV	31
Ilustración 25. Mapa esquemático de un BEV con varias ECU [46]	32
Ilustración 26. Matriculaciones EV en EU, China y USA 2021. [41]	34
Ilustración 27. Comparación Europa Evolución FCEV e hidrogenas. (ANFAC, s.f.)	35
Ilustración 28. Representación del Plan de Red Mínima de 150 HRS [6]	36
Ilustración 29. Barómetro electromovilidad en España [46]	37
Ilustración 30. Mapa puntos de carga de la REE prevista para 2030 [8]	38
Ilustración 31. Evolución GEI en España [45]	41
Ilustración 32. Comparativa ICE vs FCEV de los GEI emitidos en el ciclo de vida [4]	42
Ilustración 33. Comparativa ICE vs BEV de los GEI emitidos en el ciclo de vida [10]	43

NOTACIÓN

UE	Unión Europea
CO ₂	Dióxido de carbono
I+D+i	Investigación, Desarrollo e innovación
PERTE	Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica
uma	Unidad de masa atómica
GEI	Gases Efecto Invernadero
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (Portadores de hidrógeno líquido)
ANFAC	Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
REE	Red Eléctrica Española
WLTP	Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros
HRS	Plan de Desarrollo de Hidrogeneras
MITERD	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (vehículo de hidrógeno)
BEV	Battery Electric Vehicle (vehículo 100% eléctrico)
ICE	Internal Combustion Engine (Motor de combustión interna)

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Emisiones

El cambio climático es un hecho científico que ha sido demostrado durante las últimas décadas mediante numerosas investigaciones climáticas. Estos cambios pueden ser naturales, pero según argumentan las Naciones Unidas (UN) el motivo principal es la quema de combustibles fósiles. Este modelo energético actual es insostenible, por ello las naciones más importantes del mundo han desarrollado acuerdos globales, tales como, los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el acuerdo de París y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático para garantizar una transición energética hacia las energías renovables [36]

De acuerdo con las cifras de la Unión Europea (UE) el transporte es responsable de más del 30% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la UE. Si se observa el gráfico elaborado a partir de los datos obtenidos en el 2016 de la UE, último año del que se tienen referencias, el automóvil produce un 60,7% de las emisiones de CO₂ en el transporte. [37]

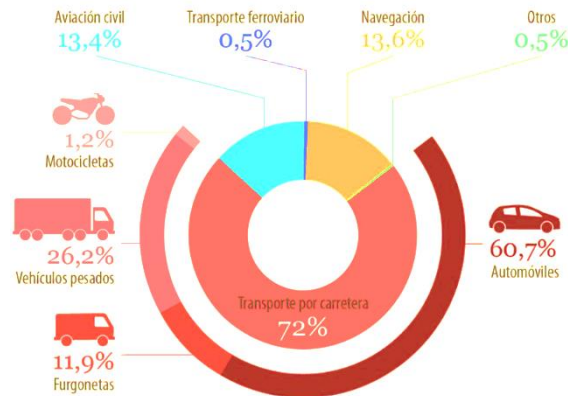


Ilustración 1. Emisiones de CO₂ originadas por el transporte [37]

Con la vista puesta en una transición energética hacia combustibles no contaminantes y renovables, es necesario que se use un combustible inagotable, como es el hidrógeno, una alternativa real ya que la reacción química que se genera en la combustión es únicamente vapor de agua y es el elemento más abundante de la Tierra. Adicionalmente, la electricidad de origen no fósil está llamada a ser un vector energético en el proceso de transición por su capacidad de generar energía libre de emisiones.

Un informe elaborado en 2018 por la consultora PricewaterhouseCoopers [42] sugiere que, en los próximos años, debido al aumento de la población y a una mayor demanda de servicios de movilidad, tendremos un aumento de los kilómetros recorridos por persona y año en los mayores mercados. El

informe también recoge que el vehículo será usado de forma más intensiva, por lo que necesitará ser sustituido con mucha mayor frecuencia (Véase Ilustración 2)



Ilustración 2. Kilómetros recorridos por persona [42]

La lucha contra el cambio climático, los hábitos hacia un uso más intensivo del vehículo, y la búsqueda de una mayor libertad económica de países sin recursos de hidrocarburos, son tres macro-tendencias que impulsan la necesaria transición energética hacia un mercado libre de emisiones.

El pasado 8 de junio de 2022 el Parlamento Europeo aprobó la prohibición de la comercialización de coches y furgonetas con motor de combustible, así como los motores híbridos y de diésel a partir de 2035. Esta iniciativa es una medida para acelerar la introducción de los vehículos de combustibles no fósiles en Europa

No obstante, el panorama actual es bien diferente. La Ilustración 3 es una representación del porcentaje de ventas en el primer trimestre de 2022. El porcentaje de ventas de vehículos con motor de combustión interna durante este primer trimestre es del 87,1 % según European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). No obstante, a pesar de ser un dato alarmante, las matriculaciones de coches de diésel y gasolina se han reducido 5,3 y 4,8 puntos porcentuales respectivamente respecto al primer trimestre del año anterior, mientras que los BEV (vehículos de batería eléctrica) duplicaron su cuota de mercado en este último año. [1]

El aumento de ventas de coches eléctricos es un mercado en pleno auge y así lo demuestran las cifras (Ver Ilustración 4). En el 2012, se vendieron 130.000 coches eléctricos en todo el mundo. En el 2021, la cifra llegó hasta los 6,6 millones, triplicando así su participación de mercado con respecto a 2019. Los mayores fabricantes en el año 2021 han sido China y Europa con 3,4 millones y 2,3 millones de unidades respectivamente. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) estima que hay 16 millones de coches eléctricos en las carreteras. [29]

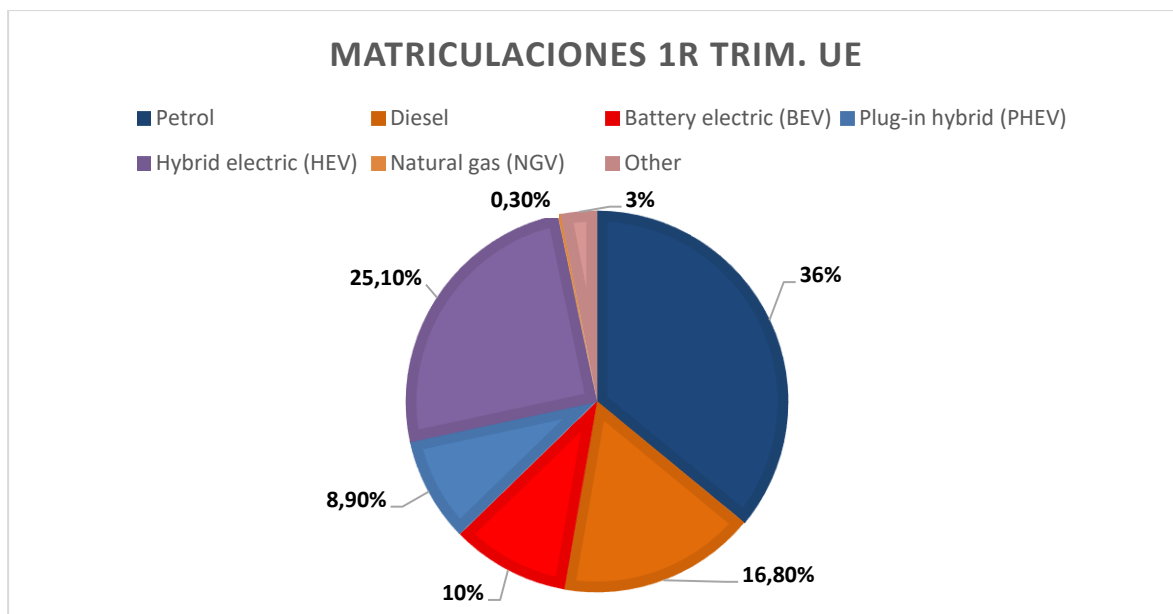


Ilustración 3. % Matriculaciones vehículos en 1r trimestre en la UE [1]

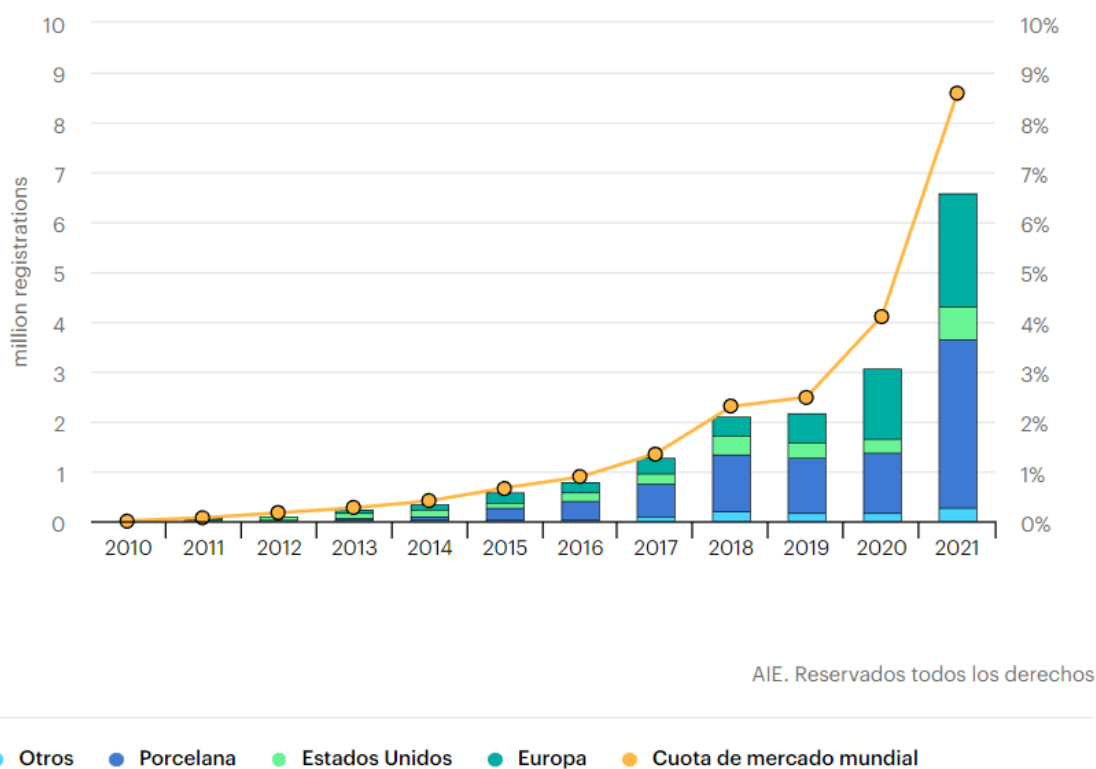


Ilustración 4. Ventas globales y participación el mercado de ventas de coches eléctricos 2010-2021. [29]

En este trabajo fin de grado se explorarán las líneas actuales y de futuro en los automóviles de hidrógeno y eléctricos llamados a ser la solución de este proceso de transición energética.

1.2. La electrificación automovilística

Tras la crisis del petróleo de los años 70 la industria automovilística ha estado sujeta a una constante presión legislativa con el objetivo de reducir los consumos de combustible, reducir la emisión gases de combustión y aumentar en general la eficiencia energética. Esto la ha llevado a una constante inversión en nuevas tecnologías, sin embargo, nunca ha existido un camino único.

Las primeras medidas que se adoptaron en los vehículos de combustión interna propulsados por gasolina fue la introducción de la inyección directa que permitió a los fabricantes reducir las emisiones de CO₂ por el menor consumo de combustible. Posteriormente, la industria apostó por el desarrollo de los vehículos impulsados por motores diésel. Este cambio supuso un gran impacto en la automoción ya que se estima que el uso de este tipo de combustible redujo en un 20% respecto a la gasolina los efectos de gases invernadero [30]

Otras medidas que adoptó la industria fue el desarrollo de nuevos materiales. La búsqueda de nuevos compuestos ha provocado una considerable reducción de peso de los vehículos y un aumento de la resistencia de los materiales (fibras de carbono, plásticos de última generación, etc.). Otra característica importante ha sido la flexibilidad de algunos materiales que ha permitido mejorar la aerodinámica y reducir el consumo.

A partir del año 2010, y tras la crisis que provocó el “dieselgate” por el que se demostró que los mayores fabricantes de automóviles, para superar las crecientes exigencias regulatorias sobre la reducción de emisiones, manipularon los resultados de los test que se realizaban a los vehículos, la electrificación automovilística ha sufrido un gran impulso gracias a las políticas verdes de la UE, ya que reducen en gran medida las emisiones de combustible fósil. Y más recientemente, la inversión en I+D+i para el uso de hidrógeno como sustitutivo al combustible fósil ha situado a esta fuente de energía como alternativa, “cero emisiones”, a los motores eléctricos.

Para llegar a los objetivos de emisiones que se marca la UE es indispensable una mayor inversión en la planificación necesaria de infraestructuras de recarga y nuevos métodos de obtención de suministro más respetuosos con el medio ambiente.

2 VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO

2.1. Descripción

Citando a Julio Verne en su novela “La isla misteriosa” (1874): “*Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor. El agua será el carbón del futuro*”. [49]

Como se ha discutido en la introducción, es necesario realizar una transición energética renovable y sostenible para combatir el cambio climático y el hidrógeno representa una buena opción. El hidrógeno representa el 75% de la materia del Universo.

2.2. Mercado actual

El mercado del hidrógeno lleva décadas en auge, un estudio desarrollado por el World Energy Council en colaboración con PricewaterhouseCoopers y el Electric Power Research Institute revela el potencial del mercado del hidrógeno a nivel global. [20]

El informe detalla que la transición energética del hidrógeno se encuentra en una fase inicial, tan solo hay doce países que hayan detallado un plan estratégico, siendo España uno de ellos. La Hoja de ruta del Gobierno del hidrógeno renovable establece, entre otros, alcanzar 4 GW de capacidad de producción en 2030, un 10% del total de la UE. El mismo informe destaca la ventaja competitiva que tiene España con el resto de los competidores gracias a la cantidad y calidad de recursos renovables que dispone, por este motivo España destinará 1.555 millones del PERTE (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) a proyectos relacionados con el hidrógeno renovable, más que cualquier otro elemento del PERTE [11]. Se estima que la inversión en hidrógeno movilizará adicionalmente 2.800 millones de capital privado.

En la misma línea, la UE identifica el hidrógeno como un elemento vital para el cumplimiento de sus políticas ecológicas. Por ello, la UE ha desarrollado el ‘EU Hydrogen Strategy’ que prevé una inversión en hidrógeno verde entre 180.000 y 470.000 millones de euros entre 2021 y 2050 lo que supondrá un 14% del *mix* energético, frente al 2% actual. Además, el plan de la UE es producir 10 millones de toneladas y alcanzar 40 GW de capacidad de producción para 2030. [2]

El informe de World Energy Council cita a las industrias químicas y de transporte pesado con un mayor impacto económico inmediato. En España, las refinerías y los productos químicos son los sectores más prioritarios. No obstante, sigue existiendo gran incertidumbre debido a la falta de inversión planificada desde los sectores públicos y privados en infraestructura.

Asimismo, son necesarias nuevas políticas de ayudas hacia una transición verde. La problemática reside en los llamados costes de transición energética, que no son más que los costes de cambiar un

modelo productivo basado en producción de energía basada en combustión de hidrocarburos, hacia otro en que la energía debe producirse por fuentes renovables, y éstas tienen hoy en día un mayor coste de producción. Eliminar la barrera del coste que frena la transición energética requiere incentivos financieros. Un ejemplo fue el aumento impositivo para las emisiones de CO₂ que instauró Noruega. Sin embargo, el uso de incentivos no está exento de riesgos, y es que la política española de 2007 de subvencionar el desarrollo de plantas de energía solar acabó en una gran burbuja especulativa y creando cuellos de oferta de algunos materiales que aumentó aún más los costes de las plantas. [20]

2.3. Producción y distribución

Independientemente de su origen, aunque prácticamente cualquier sustancia con hidrógeno en su composición puede servir como fuente de producción, solo aquellos con un alto porcentaje de hidrógeno en su composición son viables debido a menores costes de producción asociados

Alrededor del 95 % de la producción actual del hidrógeno consiste en el reformado de hidrocarburos fósiles, esto es debido a un menor coste de producción asociado. El hidrógeno es un elemento más ligero de la naturaleza con un peso atómico de 1,00794 uma. Por este motivo, el hidrógeno se encuentra enlazado al carbono, oxígeno o ambos.

La Tabla 1 compara el consumo energético de la extracción de la molécula H. Esta extracción resulta más asequible a partir de compuestos en estados energéticos elevados, como es el caso de los combustibles fósiles, dado que en el propio proceso se produce parte de la energía necesaria, al contrario de lo que sucede en compuestos que se localizan en estados inferiores como, por ejemplo, el agua cuya disociación demanda ingentes cantidades de energía. [3]

Tabla 1. Comparativa del consumo energético: combustibles fósiles vs agua [3]

	Gas Natural	Fracciones ligeras del petróleo	Nafta	Fracciones pesadas del petróleo	Carbón	Agua
Subproductos	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂ /S	CO ₂ /S	O ₂
Consumo energético (kJ/kmol H₂)	41.280	37.500	38.350	50.300	57.150	242.00

El reformado de hidrocarburos, principalmente de metano, es el proceso más usado y de menor coste hoy en día. La Ilustración 5 muestra otros métodos de producción como la gasificación de petróleo y carbón, aunque estos se realizan en menor medida.

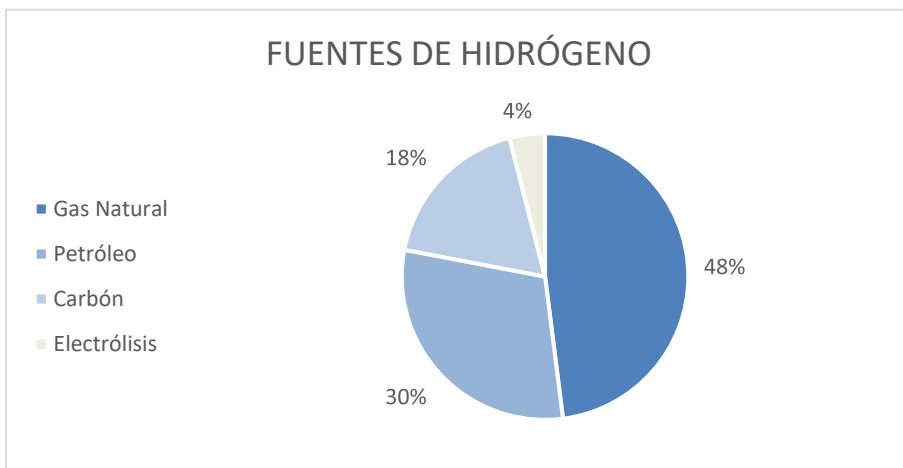


Ilustración 5. Métodos de producción del hidrógeno (Elaboración propia)

Asimismo, existen distintos ‘colores’ de hidrógeno en función del origen de la energía empleada en el proceso y las emisiones asociadas al mismo. En la siguiente Tabla 2 se observa una clasificación de los diferentes tipos de hidrógeno, cuyo rango va desde el negro (uso de combustibles fósiles) hasta el verde (uso exclusivo de energías renovables):

Tabla 2. Clasificación del hidrógeno según su producción y tecnología. [20]

TERMINOLOGÍA		TECNOLOGÍA	MATERIA PRIMA/ FUENTE ELÉCTRICA	HUELLA GEI
PRODUCCIÓN VIA ELECTRICIDAD	Hidrógeno verde	Electrólisis	Aire, solar, geotérmica, de marea	Mínimo
	Hidrógeno rosa		Nuclear	
	Hidrógeno amarillo		Energía de red de origen mixto	Medio
PRODUCCIÓN VIA COMBUSTIBLE FÓSIL	Hidrógeno azul	Reformado gas natural+ gasificación CCUS + CCUS	Gas natural, carbón	Bajo
	Hidrógeno turqués	Pirólisis	Gas natural	Carbón sólido
	Hidrógeno gris	Reformado Gas Natural		Medio
	Hidrógeno marrón	Gasificación	Carbón marrón (lignito)	Alto
	Hidrógeno negro		Carbón marrón	

En este trabajo de fin de grado se realizará una breve explicación sobre dos procesos de producción de hidrógeno para su posterior uso en pilas de combustible: el reformado con vapor de agua y la electrólisis.

Por un lado, el reformado de vapor de agua es actualmente la técnica más eficiente, económica y utilizada. Este proceso consiste en introducir vapor de agua a altas temperaturas en un catalizador para que reaccione con los hidrocarburos, ilustrado esquemáticamente en la Ilustración 6

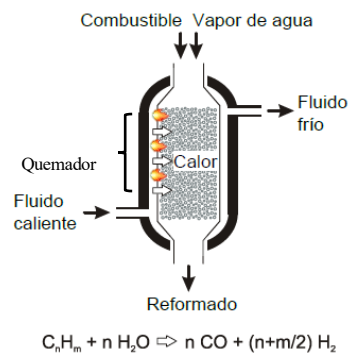


Ilustración 6. Proceso de reformado con vapor de agua [3]

Los productos resultantes del reformado de vapor son moléculas de hidrógeno y monóxido de carbono que mediante otros procesos complementarios acaban formando dióxido de carbono.

La principal ventaja de este tratamiento es su elevado rendimiento al tratarse de una operación endotérmica, es decir, la mayor parte de la energía térmica se reutiliza. El rendimiento de este proceso suele ser alrededor del 80%, pero el uso de metano puede incluso elevar este rendimiento. Ello es debido a que el metano (CH₄) tiene la mayor relación H/C: 4 átomos de hidrógeno por cada átomo de carbono. [3]

En cambio, el principal inconveniente de este proceso reside en la formación de óxidos de nitrógeno y otros gases contaminantes cuando se superan los 1480°C dentro del quemador.

Por otro lado, la electrólisis es el proceso contrapuesto al que sucede en una pila de combustible. La electrólisis utiliza electricidad para descomponer las moléculas de agua y obtener hidrógeno, sin liberar gases de efecto invernadero. Este proceso se produce dentro de un celda electrolítica, ilustrado esquemáticamente en la Ilustración 7. La electricidad que se necesita para desencadenar el proceso debe ser obtenida también a partir de fuentes renovables como son las placas fotovoltaicas, que cada vez producen energía más barata, para que el proceso sea completamente limpio. Sin embargo, es necesaria mucha inversión para poner en marcha la producción de esta tecnología, y transformar todo el sistema de producción actual.

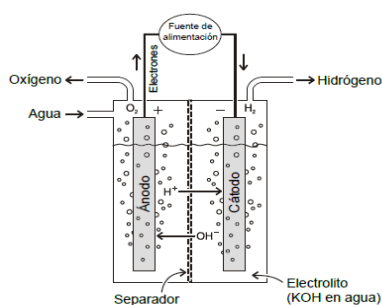


Ilustración 7. Esquema de una celda electrolítica. [3]

Los principales inconvenientes de este tipo de proceso son los siguientes:

En primer lugar, existe una alta dependencia con el precio de la electricidad y su elevado coste. Citando a Hosseini y Wahid “para generar hidrógeno libre de carbono a partir de energía solar y energía eólica a un precio competitivo con la gasolina, el costo de la energía eléctrica debe ser cuatro veces menor que el precio de electricidad comercial usando combustibles fósiles” (Hosseini & Wahid, 2016).

En segundo lugar, la electrólisis es un proceso con una baja eficiencia energética, alrededor del 65%. [3]

En tercer lugar, para compensar la baja eficiencia energética de la electrólisis, es necesaria una gran cantidad de agua para abastecer los objetivos fijados. España, tiene una Hoja de Ruta fijada por el Gobierno cuyo objetivo es alcanzar 4 GW de capacidad de producción en 2030. Para alcanzar esta capacidad, se precisa una demanda de 12 millones de litros de agua anuales. Países de la UE como Alemania han decidido externalizar ese gasto, y proponen construir centrales hidroeléctricas en países menos desarrollados para producir hidrógeno, que una vez licuado sea transportado mediante petroleros. [47]

La principal ventaja es la emisión libre de gases contaminantes, sin embargo, no hay que olvidar que es necesario llevar a cabo una fuerte inversión en infraestructuras para que la producción de hidrógeno se convierta en un proceso sostenible.

La transición hacia la economía de hidrógeno requiere actualmente una gran inversión. Hoy en día, existen pocas redes de distribución de hidrógeno a nivel global y las directrices actuales discuten dos vías posibles: a) una gestión centralizada de la distribución y producción a escala mundial del hidrógeno; b) una gestión territorial de la distribución y producción a pequeña y mediana escala. [38]

Para cumplir con las demandas energéticas, el transporte del hidrógeno está condicionado por el estado en que se encuentra. La Hoja de Ruta diseña estrategias para el transporte de hidrógeno en función de los estados del hidrógeno y del vehículo. [33]

Las opciones que se manejan son las siguientes:

- Transporte por carretera: Este medio de transporte se realiza en camiones cisterna para volúmenes pequeños de hidrógeno líquido o comprimido
- Transporte ferroviario: Del mismo modo que el transporte por carretera, el transporte ferroviario transporta mayores volúmenes de hidrógeno líquido o comprimido y portadores de hidrógeno (LOHC)
- Transporte marítimo: Esta vía de transporte sirve para transportar hasta 70 toneladas de

hidrógeno mediante buques de carga.

- Otra alternativa podría ser el sistema de gaseoductos actual, aunque se tiene que realizar un análisis previo de los flujos de energía de hidrógeno y metano.

Cabe mencionar que con una mayor inversión en nuevas infraestructuras de hidroductos para el transporte de hidrógeno se podría desarrollar un abastecimiento más fácil y fluido para las hidrogeneras. [38]

La Ilustración 8 es una representación esquemática de los diferentes procesos de producción y distribución.

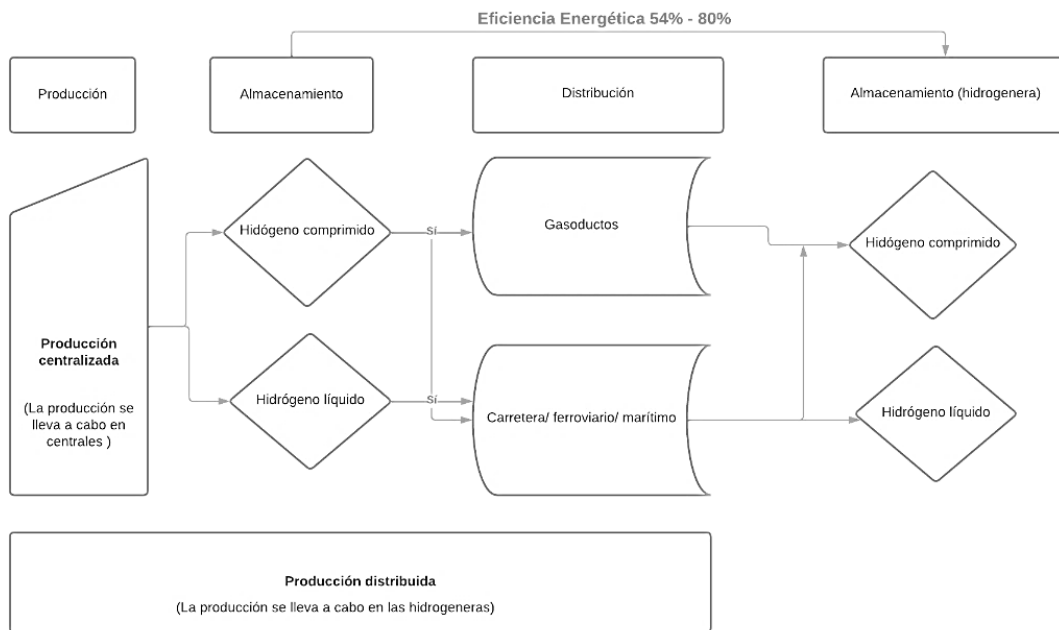


Ilustración 8. Producción y distribución hidrógeno (Elaboración propia)

2.3.1. Direcciones futuras

El reto más importante para el aumento de consumo de FCEV es producir hidrógeno verde de una manera económica y asumible para los consumidores. Recientemente, la start-up americana Verdagy afirma tener un prototipo de generador de hidrógeno verde que promete niveles de productividad y unos costos prácticamente idénticos a los de reformado de hidrocarburos en sólo tres años. Verdagy, anuncia que lograrán un coste por kilovatio hora en el rango de los combustibles fósiles para 2025 [48]. Además, la compañía norteamericana afirma que el coste llegará a ser inferior al de los combustibles fósiles para el año 2050 como se puede observar en la Ilustración 9. El sistema de Verdagy se basa en la combinación de las ventajas de la electrólisis alcalina de agua y la electrólisis de intercambio de protones ampliando el tamaño de la membrana, sin los problemas de las tecnologías actuales.

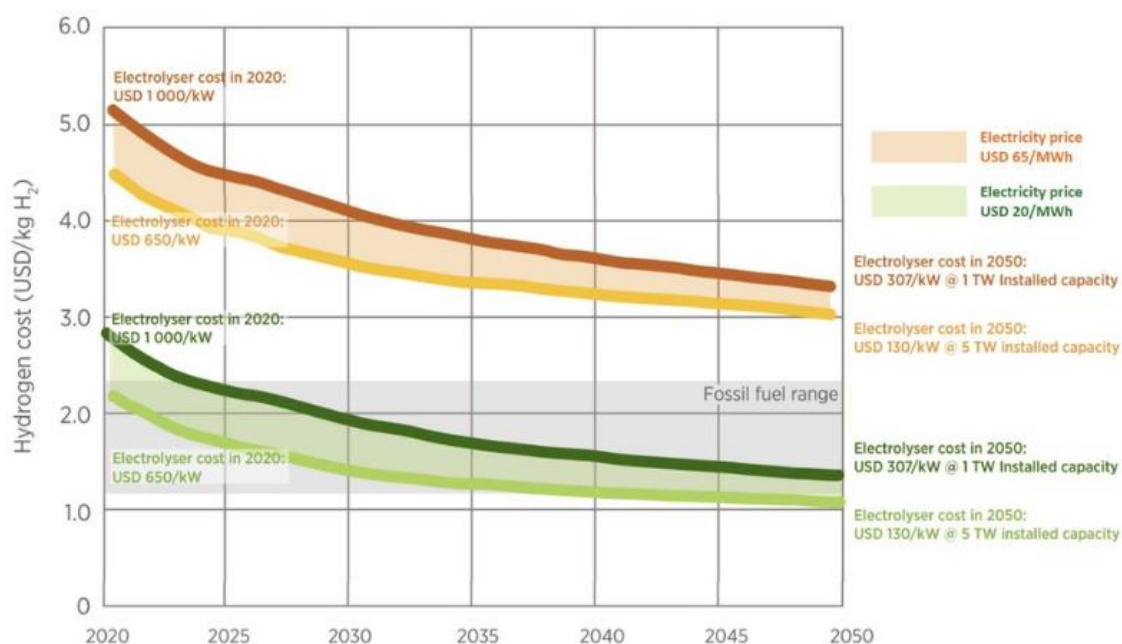


Ilustración 9. Evolución coste hidrógeno [48]

Otro proyecto de investigación llevado a cabo por el Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología, el Centro para la Investigación del Hidrógeno y Pilas de Combustible, y el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Hangyang se ha centrado en un nuevo tipo de membrana basado en el intercambio de aniones y eliminando los materiales más costosos como el platino. Los investigadores indican que esta nueva membrana reduciría el coste de producción unas 3.000 veces. Asimismo, afirman que este nuevo mecanismo aumenta la efectividad del proceso de electrólisis y la durabilidad del mismo. [15]

2.4. Almacenamiento

El hidrógeno es un combustible con baja densidad de energía, pero alta energía específica (kg). Como resultado, es necesario generar ingentes cantidades de hidrógeno en condiciones estándar. Las elecciones de sistemas de almacenamiento de hidrógeno [9] se limitan a los siguientes métodos:

En primer lugar, los tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido son el método más extendido. Debido a su baja densidad energética, el hidrógeno se almacena en tanques de altas presiones entre 200-700 bar. Sin embargo, este proceso supone un elevado coste energético.

En segundo lugar, el hidrógeno puede almacenarse en tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido. El hidrógeno líquido se obtiene a partir de la licuación, que consiste en el paso de gas a líquido y requiere un gran consumo de energía. Los principales inconvenientes del hidrógeno licuado son la evaporación *flash*, las fugas y algunos problemas de seguridad. Este tipo de método de conservación es ideal para grandes volúmenes de hidrógeno.

En tercer lugar, los sistemas de almacenamiento de hidrógeno sólido en hidruros metálicos es la vía de almacenamiento del hidrógeno que más ilusiona, debido a su seguridad y eficiencia, pero la necesidad de mano de obra experta y tecnología compleja encarece el coste de almacenamiento. El principio de

funcionamiento se fundamenta en la condición de que ciertos metales en altas presiones absorben el hidrógeno formando hidruros metálicos, por lo que al tener una composición química metálica puede almacenarse a bajas presiones.

En la siguiente Tabla 3 se comparan las diferentes formas de almacenamiento desarrolladas previamente:

Tabla 3. Ventajas y desventajas según la forma de almacenamiento (Elaboración propia)

Forma de almacenamiento	Ventajas	Desventajas
Hidrógeno comprimido	Seguro Económico	Coste elevado de transporte
Hidrógeno líquido	Almacenamiento optimizado respecto el hidrógeno comprimido	Almacenamiento a muy baja temperatura Evaporación <i>flash</i>
Hidruros metálicos	Alta eficiencia de volumen Muy seguros	Tecnología costosa

En resumen, minimizar los costes de transporte y producción deben ser los objetivos prioritarios para que el hidrógeno compita con otras fuentes de energía.

2.4.1. Direcciones futuras

Las líneas de investigación en el almacenamiento del hidrógeno se centran en reducir el volumen de los depósitos y aumentar la eficiencia energética actual. Recientemente, un grupo de científicos del Laboratorio de Berkeley, juntamente con la Oficina de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible, ha descubierto el uso de materiales metal-orgánicos (MOF) que actúan como esponjas. El estudio también ha revelado que los MOF son competitivos en costo con el almacenamiento de hidrógeno líquido y tienen una mayor densidad energética que el almacenamiento de hidrógeno comprimido, por lo que requieren menos espacio [52]. En la misma línea, la empresa automotriz Daimler, apuesta por el repostaje de hidrógeno líquido (criogenizado a -253°C), que maximiza la densidad energética y permite acumular más hidrógeno en un depósito del mismo tamaño

2.5. Principio de funcionamiento y elementos característicos

Citando a Alana Stewart “A veces solo tienes que dejar lo viejo y confiar en que algo mejor va a ocupar su lugar, incluso si da miedo enfrentar el cambio y lo desconocido”. Análogamente, la tendencia actual en el mercado es la sustitución de vehículos de combustión interna por otros que incorporen

tecnologías respetables con el medio ambiente. Hoy en día, el conocimiento de la tecnología y el funcionamiento de los FCEV es una incógnita para la mayoría de clientes potenciales, como sucedió con los BEV dos décadas atrás.

La Ilustración 10 muestra los diferentes elementos de los FCEV, que como cualquier coche de combustión interna se divide en cuatro categorías de componentes básicos:

- I. Propulsión
- II. Chasis
- III. Electrónica automotriz
- IV. Carrocería/Cuerpo

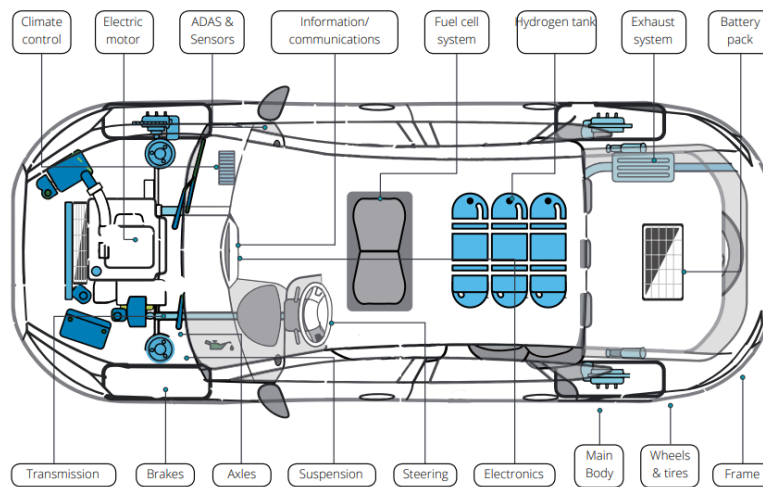


Ilustración 10. Componentes FCEV [13]

Para comenzar, se describe una breve descripción del principio de funcionamiento de los coches de hidrógeno. La Ilustración 11 es una representación esquemática del principio de funcionamiento de los FCEV [13]:

Generalizando, el diseño de este tipo de vehículo está centralizado en el funcionamiento de una pila combustible que dispone de cuatro sistemas auxiliares:

- I. Sistema de suministro del hidrógeno
- II. Sistema de suministro de aire
- III. Sistema de gestión de agua
- IV. Sistema de calor

En primer lugar, el sistema de suministro se encarga de transportar el hidrógeno desde los tanques hasta la pila. (a) en ilustración 11

Seguidamente, el sistema de suministro de aire proporciona oxígeno a la pila para generar una reacción química interna dentro de la pila y producir electricidad. (b) en ilustración 11

En tercer lugar, los sistemas de gestión de agua y calor sirven para eliminar calor residual y los productos (agua) procedentes de la reacción de la pila. (c) en ilustración 11

Por último, la electricidad generada en la pila pasa a través de una unidad de potencia al motor eléctrico, con la ayuda de una batería auxiliar en caso de necesidad energética.

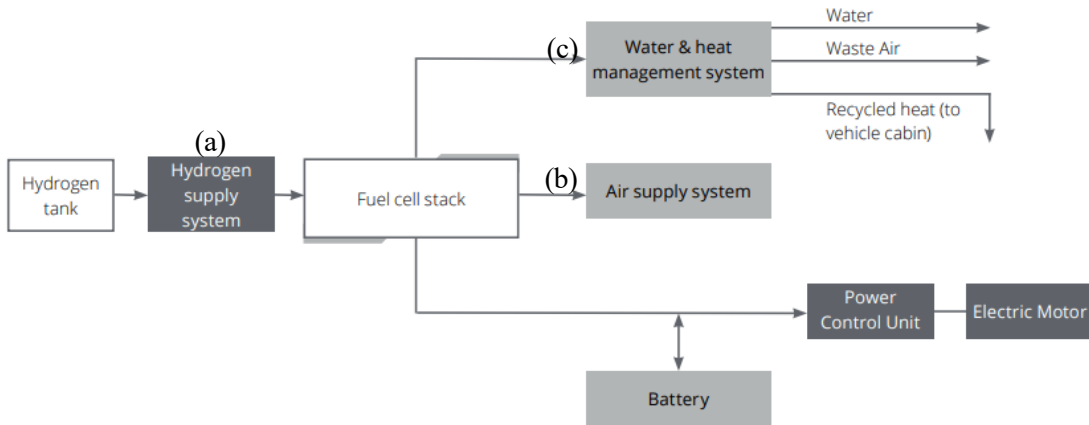


Ilustración 11. Principio de funcionamiento FCEV. [13]

A continuación, se realizará una breve descripción de los componentes característicos más importantes en un FCEV:

i. Pila de combustible

En primer lugar, el elemento más importante de los FCEV es la pila de combustible. La pila de combustible es un dispositivo electroquímico cuya función es obtener energía eléctrica a partir de la energía química.

En la siguiente Ilustración 13 se observan las distintas partes:

- Electrodo: Ánodo y cátodo
- Electrolito
- Placas bipolares: Separan celdas, conducen gases y evacúan agua.

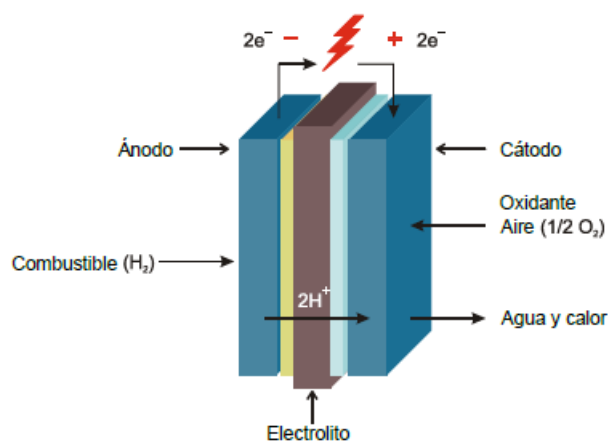


Ilustración 13. Componentes pila de combustible. [3]

Para la clasificación (ver Tabla 4) de las diferentes de pilas de combustible y sus principales características, se diferencian los diferentes tipos de pila en función del electrolito utilizado porque es el responsable de la temperatura de funcionamiento en el interior.

Tabla 4. Clasificación pilas de combustible según electrolito (Elaboración propia)

Tipo de pila	PEMF	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Membrana polimérica	Disolución alcalina	Ácido fosfórico	Carbonato líquido	Óxido cerámico
Temperatura de funcionamiento	60-80 °C	100-120 °C	200–250 °C	~650 °C	800–1000 °C
Transportador de carga	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻
Rango de potencia	5 W – 250 kW	5 kW – 150 kW	50 kW – 11 MW	100 kW - 2 MW	50 kW – 250 kW
Aplicaciones	-Transporte -Portátiles -Residencial	Aeronáutica	Generación eléctrica y calor	Generación eléctrica y calor	Generación eléctrica y calor

En el sector automovilístico la pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC) es la más utilizada debido a sus propiedades. Las PEMFC tienen un punto de trabajo de temperatura bajo y tienen una respuesta operativa bastante elevada. En comparación con las otras pilas de combustible, las PEMFC operan a temperaturas relativamente bajas (50-100°C) y tienen tiempos de respuesta rápidos. Como resultado, los componentes tienen un menor deterioro, aumentando la vida útil del mismo. Además, las PEMFC proporcionan una gran densidad energética y su diseño es ligero y pequeño.

ii. Depósito de hidrógeno

El depósito de hidrógeno es elemento del vehículo que almacena y suministra a la pila de combustible el hidrógeno requerido.

En el *Almacenamiento* se han hablado de los diferentes tipos de depósitos y sus características, generalmente el método de almacenamiento más extendido es el gas comprimido, aunque también existen tanques de hidrógeno líquido.

iii. Motor eléctrico

Se trata de uno de los elementos más importantes de los FCEV. El motor eléctrico realiza el proceso de conversión de la energía eléctrica que se genera en la pila de combustible en energía mecánica a las ruedas.

iv. Batería

Por último, las baterías. A diferencia de los BEV, cuyas baterías tienen una mayor eficiencia, como se discute en *Almacenamiento*, las baterías en los FCEV son más pequeñas porque su funcionalidad está más restringida [46]. Las funciones más importantes de una batería en un FCEV son:

- I. Iniciar el movimiento del coche desde la parada
- II. Ayudar a la pila de combustible durante las fases de aceleración que lo requieran
- III. Almacenar la energía que se produce durante las fases de deceleración

2.6. Modelos en el mercado

La primera empresa automovilística en lanzarse a producción en serie de FCEV fue la compañía coreana Hyundai, pero debido a las dificultades de producción e ineficiente infraestructura decidió retirarse. No fue hasta 2018 cuando la competencia, en este caso la japonesa Toyota, lanzó en 2015 al mercado su modelo Toyota Mirai, esto provocó que Hyundai volviera a la producción de FCEV con el modelo Hyundai Nexo. Toyota, actualmente líder en el sector lanzó en 2021 su último modelo: Toyota Mirai II.

Mientras que los dos modelos más populares concentran el 98% de compradores del mercado [35], hay otros modelos que aumentan su popularidad como Honda Clarity

La Tabla 5 resume el volumen de ventas y especificaciones:

Tabla 5. Especificaciones FCEV con mayor número de matriculaciones en España en el 2021 (Elaboración propia)

MODELO	VENTAS	PRECIO	AUTONOMIA	POTENCIA	VEL. MAX.	PESO
1 Hyundai Nexo	9.208	72.250€	670 km	184 CV	180 km/h	1.814 kg
2 Toyota Mirai II	5.797	65.00€	660 km	182 CV	176 km/h	1850 kg
3 Honda Clarity	350	57.000€	650 km	174 CV	175 km/h	1.925 kg

En España apenas hay comercialización de estos vehículos, según la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) registró tan solo 15 el número de unidades matriculadas el último año, muy lejos de países vecinos como Francia o Alemania. Sin embargo, el mayor mercado se encuentra en el continente asiático, en concreto Corea del Sur, representa el 55% del volumen global de coches de hidrógeno. [35]

Para impulsar el despliegue de esta tecnología ANFAC ha desarrollado un informe de 10 medidas para contribuir al impulso necesario de la infraestructura de repostaje de hidrógeno en España siguiendo las

pautas marcadas por la Hoja de Ruta del Hidrógeno. [7]

3 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

3.1. Descripción

La historia del automóvil demuestra que el vehículo eléctrico no es una novedad. En 1881, Gustave Trouvé fue el primer hombre en construir el primer vehículo eléctrico; El motor de explosión de gasolina hizo descarrilar este vehículo, al ser un motor de mayor autonomía y velocidad. Sin embargo, los esfuerzos de la humanidad por construir un vehículo impulsado por energías renovables no han cesado. [46]

Como se ha descrito en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, uno de los mayores desafíos en nuestra sociedad es desarrollar a tiempo nueva tecnología que reemplacen a los combustibles fósiles para reducción de emisiones de CO₂ y por qué los combustibles fósiles tienen reservas limitadas.

Existen tres tipos distintos de vehículos eléctricos en funcionamiento:

En primer lugar, están los vehículos de cable. Se tratan de vehículos cuyo trayecto va de un punto A a un punto B. Un ejemplo de este tipo de vehículos son los tranvías

En segundo lugar, están los vehículos híbridos. Estos vehículos combinan un motor de combustión interna con un motor eléctrico. Existe un gran catálogo de este tipo de vehículos en el mercado.

En tercer lugar, los vehículos 100% eléctricos o BEV. Los BEV están impulsados por uno o más motores eléctricos que utiliza la energía eléctrica almacenada en las baterías recargables y la transforma en energía cinética.

El objeto de estudio de este capítulo será solo los BEV, no se detallará más sobre los dos primeros tipos

3.2. Mercado actual

A diferencia de la tecnología del hidrógeno que precisa de grandes avances tecnológicos para mejorar la eficiencia energética. El desarrollo del coche eléctrico no precisa de mejores eficiencias en la mejora de la producción de electricidad; no obstante, el mercado de producción de electricidad se encuentra en un cambio constante por la sustitución de las fuentes tradicionales: carbón, gas, fuel y nuclear hacia otras fuentes más sostenibles

La Ilustración 14 representa los ocho factores de inversión en la Red Eléctrica Española (REE) para alcanzar los objetivos impuestos dentro del Marco Europeo según un estudio de Deloitte [14]. El estudio divide los factores en tres grandes grupos:

- Descarbonización y electrificación de los usos finales de la energía
- Modernización y digitalización de las redes

- Aumento resistencia de las redes frente a fenómenos climáticos adversos

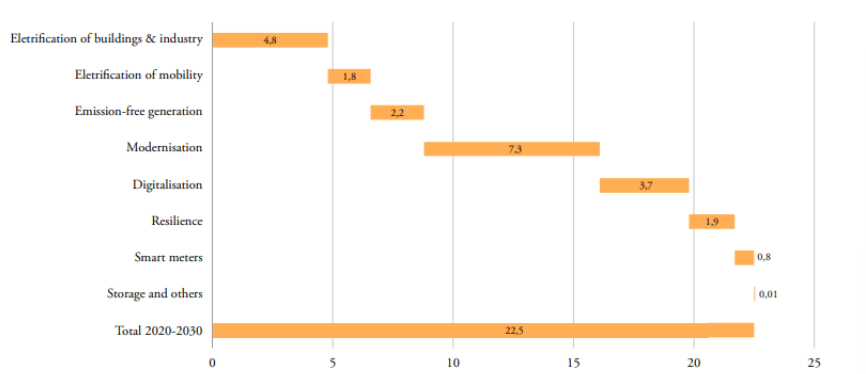


Ilustración 14. Inversiones en redes eléctricas en miles de MM €, 2020-2030 [44]

3.3. Producción y distribución

El proceso de obtención de la energía eléctrica se sustenta en el principio de Faraday. Faraday fue un físico inglés quien en el siglo XIX dedujo que los campos magnéticos podían producir electricidad. En la actualidad, el principio de funcionamiento de las centrales de producción de energía eléctrica parte del movimiento de un grupo de imanes mediante la rotación de una turbina. Estos imanes modifican la posición del material conductor respecto a las líneas de fuerza del campo magnético, induciendo una corriente eléctrica en el conducto [27].

En función de la energía que impulsa las turbinas, existen dos grupos de centrales de generación eléctrica:

Por un lado, las centrales de régimen ordinario son aquellas que se dedican a generar electricidad a grande escala.

Por otro lado, las centrales de régimen especial son aquellas que se dedican a generar electricidad de manera altamente eficiente a partir de energías renovables. La Ilustración 15 proyecta los datos del informe de la REE de las fuentes de energía renovable peninsular en el año 2020.

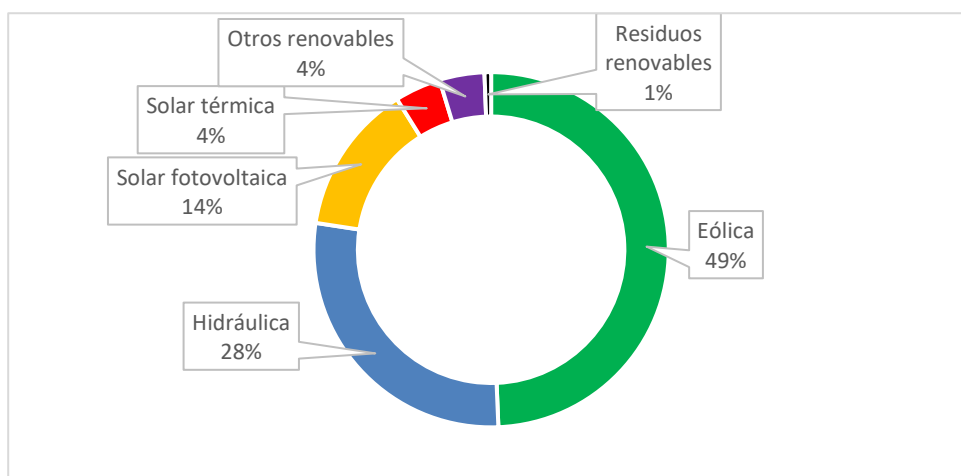


Ilustración 15. Estructura de la generación anual de la energía renovable peninsular 2020 [42]

Las conclusiones que se pueden obtener del gráfico son que existen tres grandes fuentes renovables en España que abarcan el 90% de la producción de las centrales de régimen especial:

- Energía eólica
- Energía hidráulica
- Energía fotovoltaica

Recientemente, ha aumentado el número de centrales de régimen especial debido a un menor impacto ambiental y su alta eficiencia. Según la REE la capacidad instalada de las energías renovables en el sistema de generación eléctrica peninsular en el 2020 es del 45,5%. Esto representa un aumento del 7% con respecto al 2019 [42].

El origen de las fuentes de donde se obtiene la electricidad es fundamental en la eficiencia de un BEV. Mientras que la eficiencia en una central térmica está entre el 35-60%, la eficiencia en centrales de fuentes renovables es del 100%. Según los datos de Manitoba Hydro (Ver Ilustración 16) un coche convencional de gasolina tiene una eficiencia global del 75%, mientras que los BEV pueden alcanzar una eficiencia del 77% si la electricidad es de origen 100% renovable. [19]

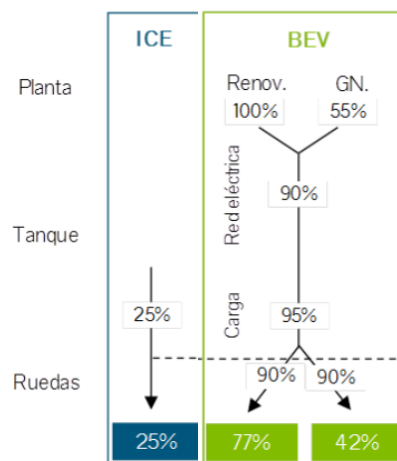


Ilustración 16. Comparativa eficiencia ICE vs BEV [19]

Ante el aumento de matriculación de BEV, para 2030 se estima un parque de 3 millones frente a los 86.621 BEV en el 2020. Es evidente que es necesario generar más electricidad para afrontar las recargas. Para cumplir con las exigencias de la transición energética y los objetivos de descarbonización marcados por la UE, la REE calcula que las renovables deberán incrementarse en el entorno de 5.000 MW cada año hasta el 2030 hasta alcanzar el 32% de la energía final consumida sea de origen renovable. [18]

Al margen del proceso de obtención, la electricidad se distribuye a los consumidores mediante una compleja red de cables eléctricos hasta las electrolineras y hogares. Hasta la actualidad, no se ha conseguido almacenar grandes cantidades de electricidad de forma fácil y barata. Como resultado, la energía eléctrica debe ser generada constantemente para atender a todas las demandas, además la cantidad de electricidad producida varía constantemente para adecuarse a la demandada sin generar excedentes de producción.

3.3.1. Direcciones futuras

Si bien las amplias líneas de transporte y distribución del Sistema Eléctrico Español, aseguran una buena cobertura. Uno de los desafíos en la distribución eléctrica para conseguir un más rápido despliegue de los BEV es el tiempo de carga de las baterías de los vehículos. En la actualidad, el tiempo medio de recarga es de 30 minutos (frente a los 5 minutos que supone el llenado de un depósito de combustible de un vehículo de combustión).

Las direcciones de investigación intentan reducir ese tiempo a tan solo 10 minutos mediante el aumento de potencia de recarga, con el aumento del voltaje en los puntos de carga. Hoy en día, la mayoría de los puntos de carga tienen una potencia máxima de 50 kilovatios, y se busca construir puntos de carga rápidos cuya potencia aumenta hasta los 150 kilovatios.

En el mismo camino, se están desarrollando nuevas tecnologías en la carga. Por un lado, está la carga bidireccional e inteligente. Este método permite que la energía fluya en dos direcciones: desde y hacia el vehículo en función de las tarifas energéticas. Esto permitirá al propietario obtener beneficios devolviendo el exceso de energía a la red, ahorra dinero aprovechando las diferentes tarifas energéticas y contar con autosuficiencia energética a través de energías renovables en tu edificio. La empresa española Wallbox es la pionera en este tipo de cargadores.

Por otro lado, para Renault el futuro de los cargadores está en la recarga inductiva dinámica sin el uso de cables lo que aumentaría la autonomía de los coches al recoger la energía eléctrica generada por inducción mientras se conduce al pasar por las bobinas emisoras, situadas íntegramente en las carreteras.

3.4. Almacenamiento

El gran reto no resuelto de la energía eléctrica es que no puede ser almacenada de forma fácil y barata, lo que obliga como se ha comentado en apartado anterior a que toda la energía eléctrica debe ser generada de acuerdo con la demanda. No obstante, con el propósito de no depender de la red eléctrica, las baterías son dispositivos que almacenan energía en compuestos químicos capaces de generar carga eléctrica

Los criterios a la hora de elegir la batería son los siguientes:

En primer lugar, la cantidad de energía almacenada determina la autonomía del vehículo.

Seguidamente, la densidad de potencia determina la potencia del vehículo en relación con el peso, ya que de nada sirve poder ceder o almacenar altas cantidades de energía si su peso es desmedido.

Otro de los factores a la hora de escoger una batería son su fiabilidad y duración. Además, las baterías tienen que ser altamente seguras debido al conjunto de reacciones químicas que se producen dentro.

Finalmente, la viabilidad de la transición de coches de combustión convencionales a vehículos eléctricos dependerá del precio. No se puede plantear precios prohibitivos para el recambio de componentes.

Una vez enumerado los factores más importantes se analizarán los principales tipos de baterías comercializadas según la tecnología que utilizan. En el mercado actual, la principal fuente de energía

de los BEV son las baterías de litio. Según un estudio publicado por la Comisión de Comercio Internacional de Estados Unidos en 2018, aproximadamente el 70% del mercado de baterías son de litio y el 20 % son de sodio [21]. El resto de las baterías como las de plomo-ácido, níquel-cadmio o níquel-hidruro metálico están en actualmente en desuso. Y otras como las de grafeno son todavía experimentales

El análisis de este proyecto se centrará en las diferentes tecnologías utilizadas en las baterías de litio y sus alternativas ante la crisis de recursos de litio.

Las baterías de litio están presente prácticamente a diario en nuestras vidas, son la principal fuente de alimentación de nuestros dispositivos electrónicos como móviles u ordenadores, y ahora en los vehículos eléctricos. No obstante, no todas las baterías de litio son iguales por ello se describirán las más comercializadas hoy en día.

El uso tan extendido de las baterías de iones de litio es debido a su elevada densidad energética, alta velocidad y capacidad de descarga de energía, excelente eficiencia de carga y descarga, una larga vida útil y una baja autodescarga en comparación con otras tecnologías de batería. Por otro lado, la tecnología de este tipo de batería está limitada debido a las reacciones químicas que suceden en su interior, ya que tienen poca estabilidad térmica. [3]

Siendo Tesla el líder indiscutible en fabricación y desarrollo de BEV es ineludible explicar qué tecnología utiliza en sus baterías. Tesla adoptó la postura de fabricar baterías NCA que están compuestas de níquel, cobalto, óxido de aluminio y litio porque ofrecen la energía específica más alta, bastante potencia específica y una vida útil prolongada; a pesar de necesitar controles de seguridad muy altos debido a su naturaleza más inestable. Sin embargo, debido a las nuevas políticas energéticas verdes, Tesla ha comenzado a fabricar en su planta de Shanghai nuevas baterías LFP. Este tipo de baterías están compuestas de litio y fosfato de hierro, El principal inconveniente del uso de fosfato es que hacen que las baterías LFP tengan una densidad energética muy baja; sin embargo, el hecho de prescindir del uso de cobalto, un material caro y complicado de conseguir, reduce mucho su precio en comparación con las baterías NCA.

Otra de las baterías con un uso más generalizado son las baterías NCM. Las baterías NCM están compuestas de litio, níquel, óxido de cobalto y manganeso. A pesar de estar llegando al límite de su rendimiento, esta tecnología ofrece una alta densidad energética y una elevada estabilidad térmica. Sin embargo, el uso de voltaje de funcionamiento es inferior al de otras baterías y es necesario operar a altos voltajes para que los BEV ofrezcan una aceleración óptima y suficiente autonomía.

La sobreproducción de baterías de litio ha creado una escasez de materias primas y de microchips que amenazan la movilidad eléctrica. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) indicó que la demanda de litio en 2040 podría ser entre 13 y 51 veces superior a la actual y de acuerdo a las estimaciones de Rystad Energy el aumento de vehículos eléctricos podría provocar un grave déficit de suministro de litio a partir de 2027 [51]

Consiguientemente, las empresas productoras más importantes de baterías han buscado nuevas tecnologías que sustituyan las baterías de litio. La tecnología ganadora ha sido la batería de sodio (NIB). Se trata del sexto material más abundante en la Tierra, puede encontrarse en los océanos y la corteza terrestre. A pesar de tener una densidad energética bastante baja, aunque si se destina más recursos en I+D+i puede mejorar, destaca por su disponibilidad, accesibilidad, ligereza y seguridad. Estas baterías son mejores que las de litio en ambientes más extremos porque funcionan en un rango

de temperatura más amplio. Además, no son inflamables y su peso tan ligero provoca una reducción en el consumo y por tanto mayor autonomía.

Tabla 6. Tipo de baterías según compuestos. (Elaboración Propia)

Tipo de batería	NCA	NCM	LFP	NIB
Compuesto(s)	níquel, cobalto, óxido de aluminio y litio	manganeso níquel, óxido de cobalto y litio	Fosfato de hierro y litio	sodio
Voltaje nominal	3.6V	3.6-3.7V	3.2-3.3V	3.2
Densidad energética	300 Wh/kg	120-220 Wh/kg	90-120 Wh/kg	160 Wh/kg
Fuga térmica	150°C	210°C	270°C	-
Ciclos de vida	500	1000-2000	2000+	1000-2000
Coste por kWh	350\$	420\$	580\$	560\$
Notas	Energía específica muy elevada	Alta capacidad y potencia	Muy seguro/ Baja capacidad	Poca experiencia

3.4.1. Direcciones futuras

En un mundo que se encuentra en plena transición de las energías fósiles a las fuentes renovables, una mejora del almacenamiento de energía eléctrica resulta vital para respaldar las nuevas tecnologías.

Tal vez, el reto más importante de los BEV es la autonomía. Según el procedimiento estándar, Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros (WLTP), la autonomía media de los BEV se sitúa en los 343 kilómetros [25], insuficiente en el caso de realizar un trayecto largo. Esto se debe en gran medida a la capacidad de almacenamiento de las baterías. En la actualidad, existen dos vías alternativas:

Por un lado, se trata de una vía que cambia el concepto actual de baterías, se trata de las baterías modulares e intercambiables. La start-up Ample es la única empresa que trabaja en este concepto. Los desafíos de la empresa son los siguientes:

El primer desafío es el uso de una arquitectura modular que permita realizar el intercambio de baterías en estaciones especializadas. Para ello, los vehículos tienen que ser compatibles con los módulos que se han desarrollado, sin importar quién los venda. De esta manera el usuario puede elegir que autonomía disponer en función de sus necesidades. Este modelo aumentaría la autonomía, la velocidad de carga y alarga la vida útil de los coches ya que la carga rápida puede provocar un efecto degradante en las baterías.



Ilustración 17. Baterías modulares

El segundo desafío y el más importante reside en el modelo de negocio que se emplee. Ample plantea que los clientes firmen una suscripción en función de la cantidad de módulos que necesiten cada mes. Khaled Hassounah, CEO de Ample, afirma que con este modelo se reducirá el uso de litio, cobalto, níquel o cualquier otra materia prima que se utilice en la fabricación de celdas, resolviendo así la crisis de materias primas. Además, este modelo de negocio impulsaría el mercado de segunda mano ya que no entraría en juego la depreciación de las baterías en el momento de vender coches. [24]

Por otro lado, la segunda vía para aumentar la capacidad de almacenamiento es utilizando nuevos materiales o elementos.

Llama la atención, las baterías de iones de litio basada en grafeno que, de poder fabricarse a gran escala, puede revolucionar el sector del automóvil. Estas baterías evitarían posibles sobrecalentamientos, aumentar 18 veces la velocidad de carga y triplicar su durabilidad. El principal inconveniente de este tipo de baterías es su precio elevado actual.

Este mes de junio 2022, la empresa china GAC, ha presentando una batería de litio-ferrostatato, basada en grafeno, que ofrece cargas ultrarrápidas y promete hasta 1,5 millones de kilómetros de vida útil.

Otra alternativa, todavía en fase de prueba es el uso de pequeños paneles solares en los techos para aumentar su autonomía en los días más soleados. Existe un modelo en el mercado, el Lightyear One que consiguió una autonomía de 400 km con una sola carga a una velocidad media de 130 km/h. El objetivo de Lightyear es lograr lanzar al mercado el BEV más eficiente del mundo, y asegura que, gracias a las células fotovoltaicas, el modelo puede recibir 72 km extra de autonomía en un día soleado. Sin embargo, actualmente se buscan nuevas tecnologías que mejoren el 20% de eficiencia de las células fotovoltaicas actuales.

3.5. Principio de funcionamiento y elementos característicos

En los inicios, la configuración de los vehículos eléctricos consistía en la sustitución del motor de combustión interna y el tanque de combustible por un motor eléctrico y un pack de baterías. Sin embargo, el coche eléctrico de hoy en día ha evolucionado significativamente.

La Ilustración 18 muestra los diferentes elementos de los BEV, que como cualquier coche de combustión interna se divide en cuatro categorías de componentes básicos:

- I. Propulsión
- II. Chasis
- III. Electrónica automotriz
- IV. Carrocería

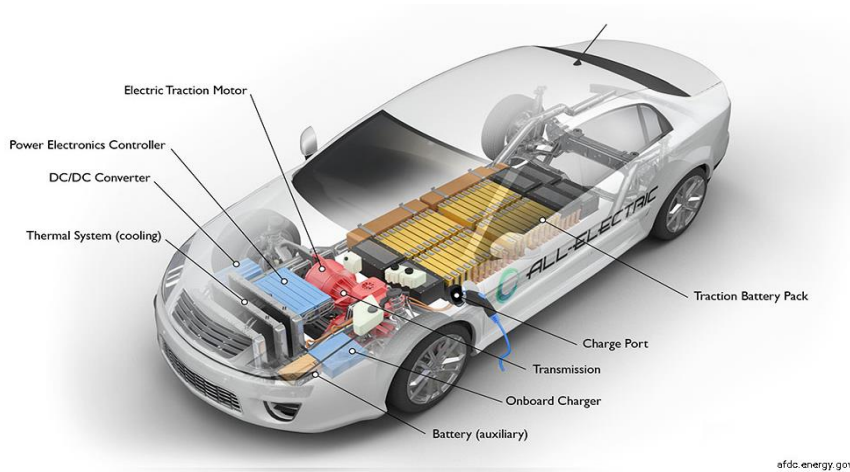


Ilustración 18. Componentes BEV

La Ilustración 19 es una representación esquemática del principio de funcionamiento de los BEV

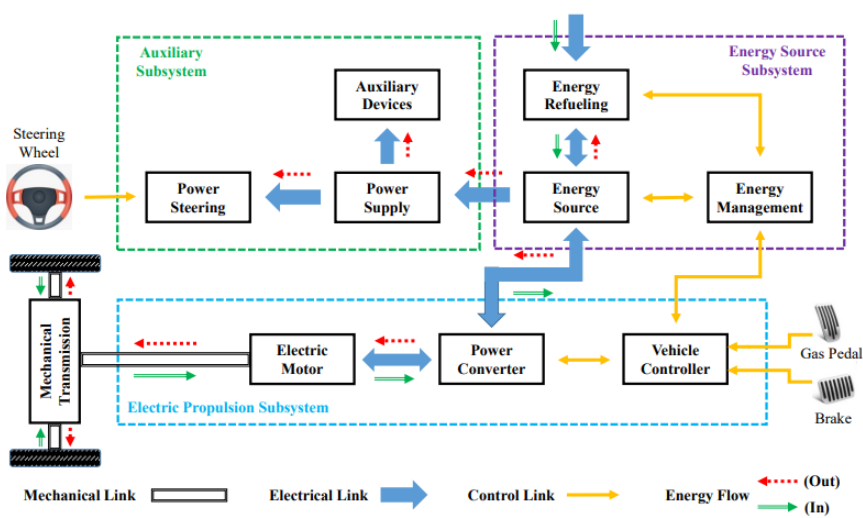


Ilustración 19. Principio de funcionamiento BEV

Generalizando, el diseño de este tipo de vehículo está formado por tres subsistemas principales:

- I. Propulsión eléctrica
- II. Fuente de alimentación
- III. Auxiliar

Partiendo de las entradas de control: acelerador y freno, el controlador del vehículo proporciona señales de control al convertidor de potencia. Este elemento regula el flujo de energía entre el motor eléctrico y la fuente de alimentación. Cabe destacar que el flujo va en ambas direcciones, esto depende de la acción que se aplique sobre las entradas de control:

En el caso de acelerar, se envía una señal al controlador que ajusta la velocidad del vehículo mediante el cambio de frecuencia de la corriente alterna del convertidor de potencia al motor eléctrico

En el caso de frenar o decelerar se produce el efecto de frenado regenerativo que acumula en la batería parte de la energía cinética que tiene el vehículo en forma aprovechable. [17]

Simultáneamente, en el subsistema de la fuente de alimentación se encuentra la unidad de gestión de energía que coopera con el controlador del vehículo para controlar el frenado regenerativo y su recuperación de energía. También se encarga de regular el repostaje y la batería.

Al mismo tiempo, en el subsistema auxiliar la fuente de alimentación auxiliar proporciona la energía necesaria para los elementos auxiliares del vehículo como la dirección asistida o el climatizador [17].

A continuación, se realizará una breve descripción de los componentes característicos más importantes en un BEV:

i. Motor eléctrico

El motor eléctrico se trata de uno de los elementos más importantes de un BEV. Es el corazón de la máquina ya que se encarga de transformar la energía eléctrica en energía mecánica en las ruedas para que el vehículo se desplace. La gran ventaja comparativa de los motores eléctricos frente a los motores de combustión interna es la generación de un par motor sin emitir ningún tipo de residuo. No obstante, este tipo de vehículos deben cumplir ciertos requisitos que satisfagan las necesidades del usuario:

El motor eléctrico debe tener una alta densidad energética; es decir, una alta potencia para un peso y tamaño reducido. Además, deben ser altamente eficientes (rendimiento medio superior al 90% en sus condiciones nominales) para superar así la barrera del 40% de los motores de gasoil de ciclo Diesel. [46]

Si bien la finalidad principal del motor es entregar par, es muy importante que no haya fluctuaciones en el par entregado para garantizar un par constante. Otro rasgo es un control sencillo; es decir, que se entregue par cuando se acelera y se acumule cuando se frene o decelere.

Otra característica importante es que este tipo de motores tengan una larga vida útil y para evitar que se convierta en una fuente de averías, éste debe tener una gran robustez mecánica y térmica.

Por último, la viabilidad del motor pasa por su coste de fabricación. Los precios de los elementos que contribuyan a la transición energética deben ser competitivos con los precios del mercado. Por ello a menor coste de fabricación, menor precio del vehículo y mayor será la venta de los mismo.

Actualmente, los motores eléctricos más comunes son los siguientes:

I. Motor asíncrono trifásico o de inducción (CA):

- Se trata de un motor formado por un estator que se alimenta de la corriente trifásica y en la cual se produce el campo giratorio, y por un rotor dentro del estator que forma el circuito inducido. Para que el rotor funcione perpetuamente la frecuencia de rotación es inferior a la frecuencia de alimentación. [46]

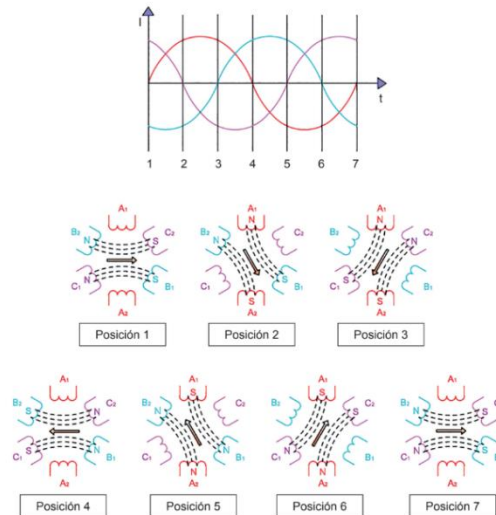


Ilustración 20. Principio del campo magnético.
[46]

II. Motor síncrono de imanes permanentes (CA)

- En los motores síncronos, la velocidad de giro es constante; es decir, la velocidad del rotor es la misma que la velocidad creada por el campo magnético. El problema de los motores síncronos es que necesitan de un dispositivo auxiliar para arrancar, los motores síncronos de imanes permanentes incorporan un regulador electrónico para arrancar el motor.
- Existen dos tipos de motores síncronos de imanes permanentes:

En primer lugar, el motor de flujo radial. Es el más común debido a su menor coste.

Por otro lado, el motor de flujo axial tiene una mejor optimización de las pérdidas cobre, por lo que son más eficientes y eso se traduce en un aumento de potencia útil del motor [46]

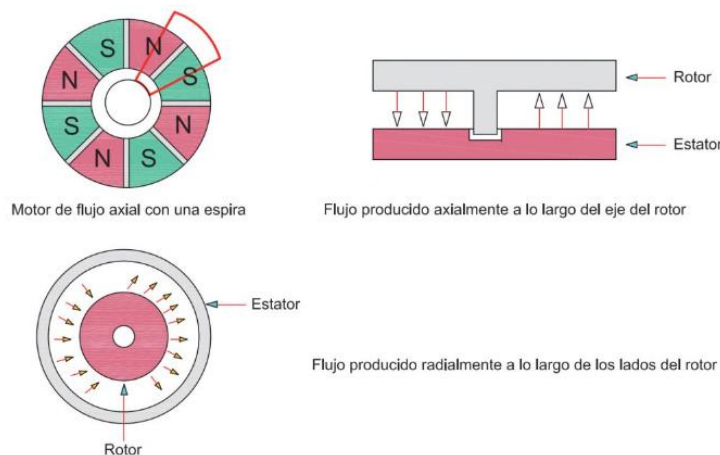


Ilustración 21. Motor de flujo axial y flujo radial. [46]

III. Motor síncrono de reluctancia conmutada (CA)

- Este motor elimina los imanes permanentes. El principio de funcionamiento de este motor es la reluctancia magnética o resistencia al paso del flujo magnético. La reluctancia depende del origen de los materiales. El objetivo es reducir esa resistencia y para ello se deben alinear el rotor y el estator.
- A diferencia de otros motores, los motores síncronos de reluctancia conmutada no pueden trabajar directamente con una fuente CA o CC. Por ello, se usa un controlador electrónico que alimenta al motor con CC [46]

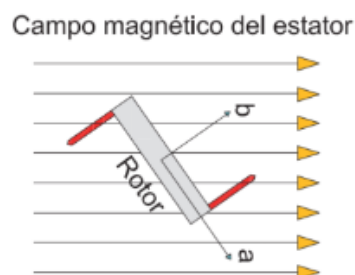


Ilustración 22. Fundamento del rotor síncrono de reluctancia y par. [46]

IV. Motor sin escobillas de imanes permanentes (CC)

- Este motor incorpora imanes permanentes en el rotor y bobinas en el estator y se basa en que las fases del motor se encienden y apagan en secuencia para hacer girar el motor.
- Se alimenta en CC para simplificar la electrónica del circuito inversor que genera un conjunto de tensiones polifásicas alternas. [46]

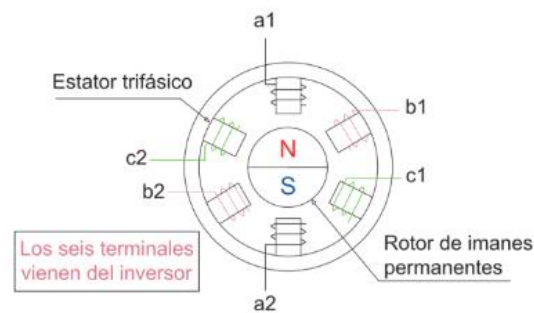


Ilustración 23. Principio de funcionamiento motor sin escobillas de imanes permanentes. [46]

La Tabla 7 muestra los diferentes tipos más comunes de motores eléctricos en el sector automovilístico y sus principales características, éstos se diferencian en función del tipo de corriente que conduce: alterna (CA) o continua (CC)

Tabla 7. Configuraciones más comunes motores eléctricos (Elaboración propia)

	CA			CC
Características	Asíncrono trifásico	Síncrono de imanes permanentes	Síncrono de reluctancia conmutada	Sin escobillas de imanes permanentes
Densidad de potencia	BAJA	ALTA	ALTA	BAJA
Eficiencia	ALTA	MUY ALTA	ALTA	ALTA
Par	Bajo ruido y vibraciones y par constante. Bajo par de arranque	Bajo ruido y vibraciones y control de velocidad sencillo	Elevado par	Bajo ruido. Buena relación velocidad-par. Control de velocidad complejo
Vida útil	MODERADA (Riesgo de sobrecarga)	BAJA (problemas de mantenimiento)	LARGA (Muy robusto)	LARGA (Robusto y poco mantenimiento)
Precio	BAJO	ALTO	BAJO	ALTO
Otros	-	-	Diseño complejo	Poca experiencia

En el sector automovilístico los motores síncronos de imanes permanentes son los más extendidos debido a sus propiedades. No obstante, la inversión en I+D+i para conseguir motores más eficientes, económicos y con mayor densidad energética continúan su camino, de hecho, Tesla originalmente usaba motores asíncronos, pero recientemente la empresa comenzó a usar el motor síncrono de reluctancia de asistido por imán permanente (IPM-SynRM). Este motor eléctrico ha conseguido llevar a Tesla a rendimientos de hasta un 97%. [22]

En resumen, todavía queda mucho campo de I+D+i para fabricar motores eléctricos que sean eficientes, de menor peso, más económicos, etc., y a su vez respetables con el medio ambiente.

ii. Batería

Es el otro componente principal junto con el motor que define la autonomía que se quiere dotar al vehículo.

Las baterías de los BEV están formadas por miles de celdas dispuestas en módulos que a su vez son ensamblados en paquetes. (Ver Ilustración 24). Estas celdas pueden tener 3 formas:

- I. **Cilíndricas:** Tienen unas propiedades térmicas excelentes y su coste en el mercado es previsible. Tesla, líder en el sector de la autonomía, monta sus baterías con celdas cilíndricas.
- II. **Prismáticas:** Tienen una combinación casi perfecta de densidad de energía, seguridad y vida útil.
- III. **Planas:** Tienen la ventaja de elegir prácticamente cualquier tipo de forma.

El Tesla está formado por 6.831 celdas de litio cilíndricas; es decir, tiene el tamaño aproximado al de un tanque de combustible en un vehículo con motor de combustión.

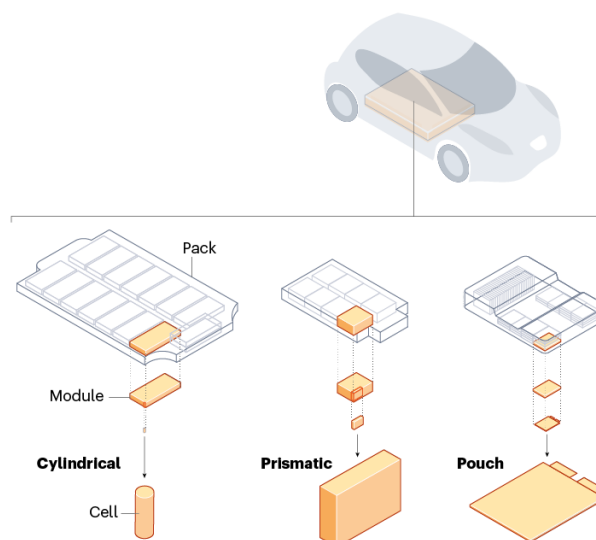


Ilustración 24. Montaje baterías BEV

En el Almacenamiento se han hablado de los diferentes tipos de baterías y sus características, generalmente la batería más extendida es la de iones de litio.

iii. Inversor

La función del inversor es convertir la corriente continua en corriente alterna para alimentar al motor, en el caso de que éste sea de corriente alterna. Otra función es la de convertir la energía procedente del frenado regenerativo para almacenar dicha energía en la batería nuevamente

iv. Unidad de electrónica de control (ECU)

La función de la ECU es regular el flujo de potencia entre el motor eléctrico y las baterías en función de los valores de las señales de entrada de los pedales de aceleración y de freno.

El principio de funcionamiento de la ECU se base en la configuración de diferentes sensores y actuadores. El proceso es muy sencillo, los sensores captan y envían información a la unidad y central y ésta envía esta información a los actuadores para transformar dicha información. [46]

Con el tiempo, el número de funciones ha aumentado y por ello se ha aumentado el número de ECU para controlar diversas funciones específicas. (Ver Ilustración 25)

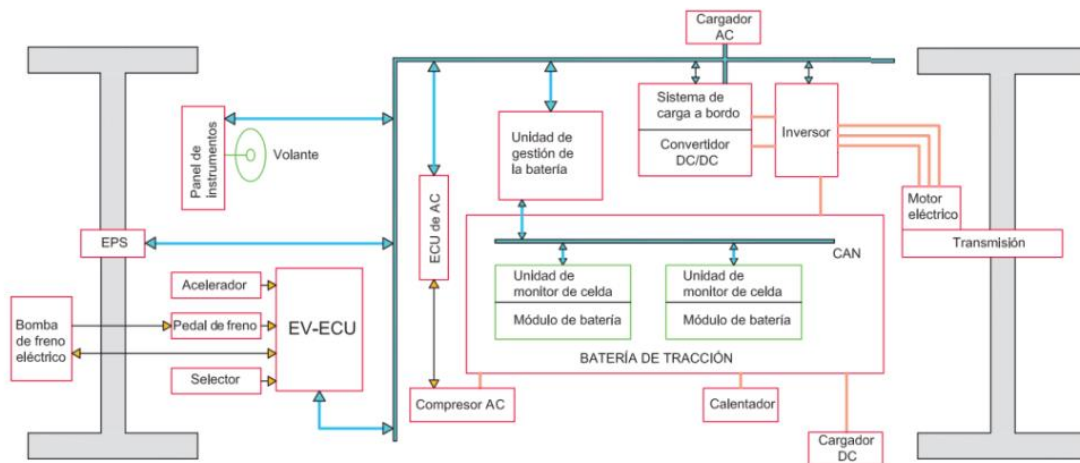


Ilustración 25. Mapa esquemático de un BEV con varias ECU [46]

3.6. Modelos en el mercado

Mucho después de que Gustave Trouvé fabricase el primer vehículo eléctrico en 1881, no fue hasta 1999 cuando General Motors lanzó el GM EV1 como el primer vehículo 100% eléctrico fabricado en serie. En la actualidad, existen una gran variedad de modelos disponibles.

De acuerdo con el informe de ANFAC [7], el pasado 2021 sólo en España se matricularon 1.037.252 vehículos de los cuales 27.762 fueron del tipo eléctrico. Este dato representa un 2.68 % de la cuota de mercado. Asimismo, en el año 2020 se matricularon un 37.76% más de vehículos eléctricos, mientras que el total de matriculaciones apenas varió un 0,43%. Esto indica un auge en la venta de vehículos eléctricos en España.

Dentro de los BEV con mayor número de matriculaciones, el informe posiciona al Tesla Model 3 como claro ganador con 2.853 unidades, prácticamente el doble a su perseguidor; el Kia Niro con 1.715 unidades, y el triple al tercero de esta lista, el Renault Zoe con 1.373 unidades.

La Tabla 8 resume el volumen de matriculaciones y especificaciones de los tres modelos estándar más

vendidos en España:

Tabla 8. Especificaciones BEV con mayor número de matriculaciones en España en el 2021 (Elaboración propia)

MODELO		VENTAS	PRECIO	AUTONOMIA	POTENCIA	VEL. MAX.	PESO
1	Tesla Model 3	2.853	49.000€	404 km	325 CV	225 km/h	1.684kg
2	Kia Niro	1.715	30.200€	289 km	136 CV	155 km/h	1.721kg
3	Renault Zoe	1.373	31.720€	313 km	110 CV	135 km/h	1.502kg

Según el estudio *Electric Vehicle Sales Review Full Year 2021* de la consultora PricewaterhouseCoopers, las ventas de los automóviles eléctricos incrementaron un 121% en todos los mercados en el 2021. El mayor aumento de ventas de BEV se produjo en China, un 172% más que en 2020. El número total de unidades vendidas fue de 3,4 millones de coches eléctricos. Esto es debido en gran medida a un gran nombre de fabricantes emergentes como SAIC, NIO, BYD o Geely... y hay unos 300 fabricantes. [41]

En Europa también se ha producido un aumento en la venta de BEV. En los 5 principales mercados europeos: Francia, Alemania, Italia, España y Reino Unido; las ventas de BEV un 25%. Además, la cuota de mercado de los coches de combustión interna ha pasado de un 92% en 2019 a un 60% en tan solo dos años, esto refleja el declive de este tipo de coches. Asimismo, en los países nórdicos el mercado de coches de combustión interna se ha visto superado por primera vez por los BEV. Por ejemplo, en Noruega, la cuota de mercado de motores de combustión interna fue tan solo del 8% en 2021, la más baja del mundo. [41]

En el mercado americano, el crecimiento interanual de los BEV llegó al 62% en 2021. No obstante, la participación de mercado de los coches con motor de combustión interna se sitúa en el 91%, aunque el crecimiento de las ventas de BEV prevé un declive a corto plazo de este tipo de automóviles. [41]

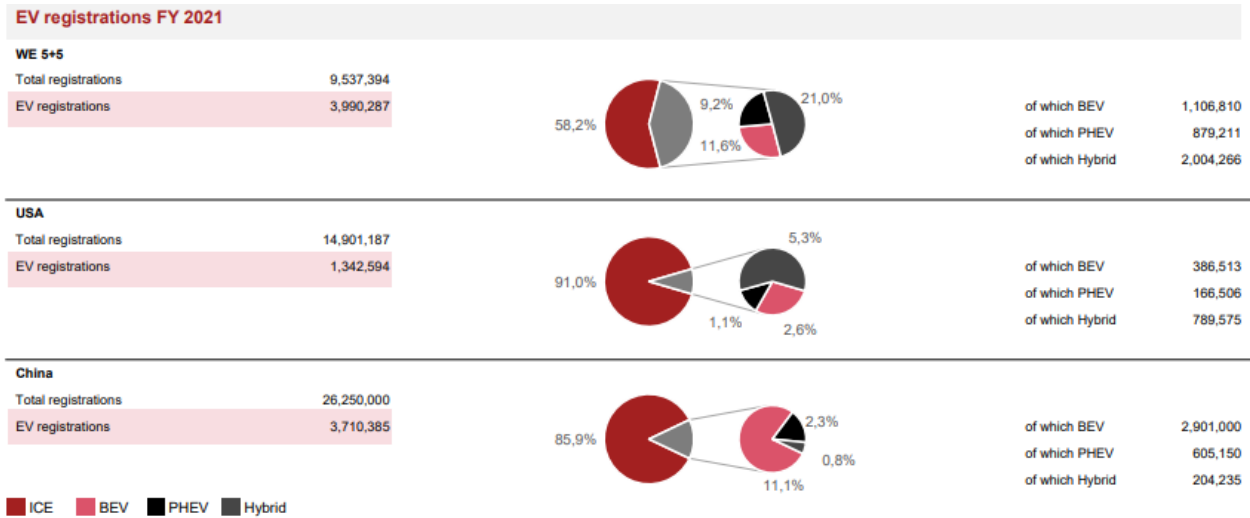


Ilustración 26. Matriculaciones EV en EU, China y USA 2021. [41]

Es evidente que la venta de vehículos ha crecido con el tiempo (Ilustración 26) y si bien está llamado a liderar el número de matriculaciones del sector automovilístico, queda mucho camino todavía. Para ello es necesario destinar grandes cantidades de dinero a su investigación, un descenso en el precio y presentar prototipos con mejores prestaciones y autonomía para el consumidor.

4 ANÁLISIS COMPARATIVO

4.1. Puntos de recarga

4.1.1 Vehículos de hidrógeno

A pesar de estar en una fase inicial, el mercado del hidrógeno está en constante auge. Por ello, el Gobierno de España ha desarrollado una Hoja de Ruta del Hidrógeno renovable. Esta Hoja de Ruta con vistas al año 2030 establece una cuota de energías renovables en el consumo final de energía en el sector del transporte de al menos un 28%. Por ello, se prevé una red de al menos 100-150 hidrogeneras de acceso público en 2030. [33]

En la actualidad, España dispone solo de seis hidrogeneras: Madrid, Sevilla, Zaragoza, Huesca, Albacete y Puertollano. Aunque éstas son de acceso privado, ninguna es de acceso público. Además, el mercado de los FCEV es prácticamente ilusorio. Ambos datos son alarmantes si se comparan con otros países de la UE en la lucha de la transición energética liderada por Alemania como se puede observar en la Ilustración 27.

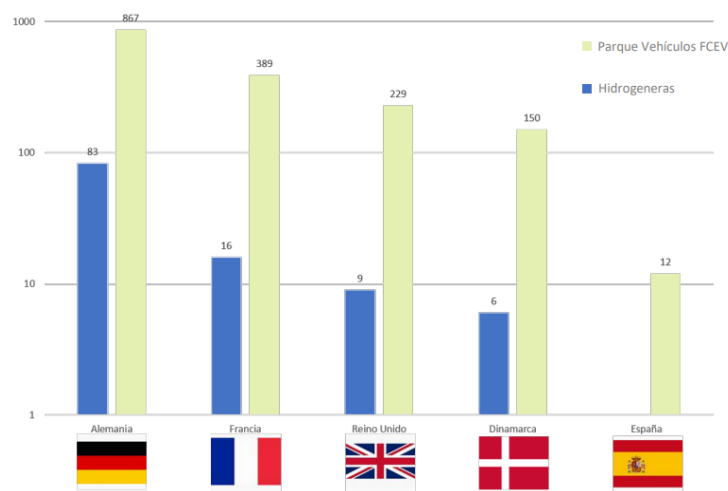


Ilustración 27. Comparación Europa Evolución FCEV e hidrogeneras. (ANFAC, s.f.)

La ANFAC ha diseñado un Plan de Desarrollo de Hidrogeneras (HRS) en España [6]. Este Plan se basa en un despliegue de hidrogeneras que garantice una red mínima de hidrogeneras con una distancia máxima de 250 km entre ellas tal y como establece la Hoja de Ruta.

Existen dos diseños de la red en función de su localización: HRS en núcleos urbanos y HRS para dar servicio a los principales corredores.

Siguiendo la Hoja de Ruta del Hidrógeno, para comenzar, se destinarán los recursos al desarrollo de hidrogeneras en los núcleos urbanos. La red en núcleos urbanos planifica la construcción de 71 HRS

en las capitales de provincia y municipios con más de 100.000 habitantes.

Sin embargo, para cumplir con el objetivo de la Hoja de Ruta del Hidrógeno que garantice una HRS cada 250km es necesario más HRS. Por ello, se construirán 79 HRS para completar la cobertura nacional de repostaje. Estas 79 HRS se dividen en 67 HRS en los principales corredores y rutas con mayor Intensidad Media Diaria medida en vehículo/día y 12 HRS junto a refinerías e industrias consumidoras de hidrógeno.

La Ilustración 28 es una representación del Plan de Red Mínima de 150 HRS diseñado por ANFAC.

El principal problema para desarrollar este Plan son los costes de instalación. El precio medio de una hidrogenera está en un rango de entre 1,5 y 3,5 millones de euros, alguna puede llegar hasta los 8 millones de euros en función de su capacidad y de si es capaz de generar in situ.

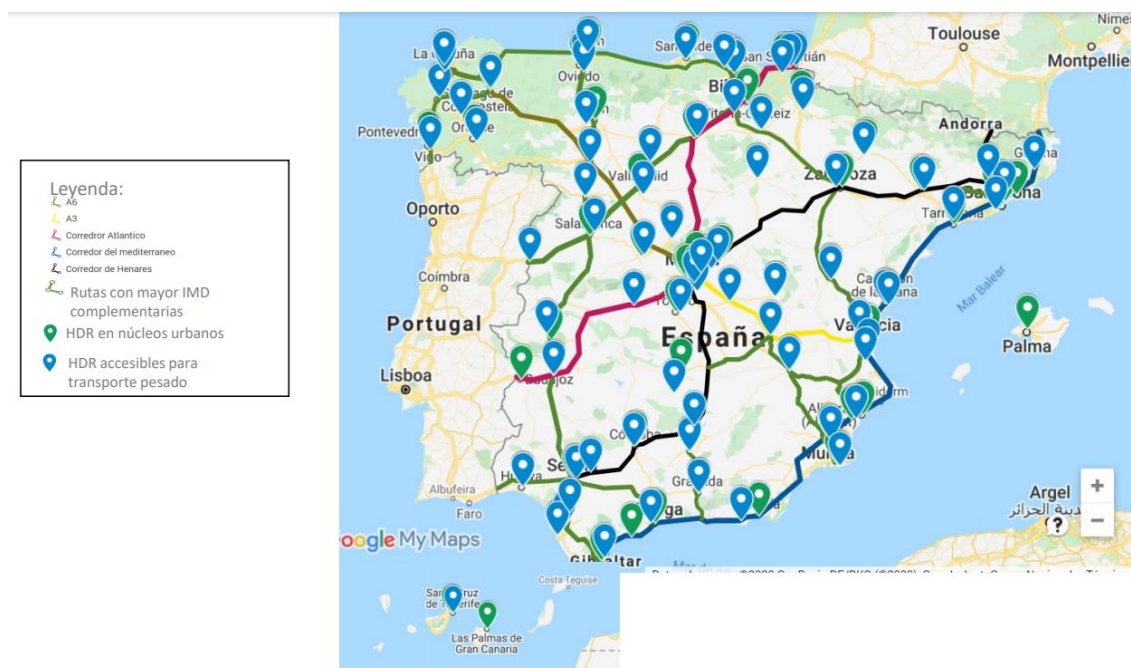


Ilustración 28. Representación del Plan de Red Mínima de 150 HRS [6]

Para impulsar el Plan de red mínima de hidrogeneras es necesario una subvención inicial entorno el 80 y el 100% del CAPEX¹ hoy en día debido la ilusoria flota de FCEV. A medida que esta flota aumente, se reducirán la subvención inicial.

4.1.2 Vehículos eléctricos

A pesar de ser una energía mucho más desarrollada, la electrificación de BEV en España es de vanguardia si se compara con otros países de la UE, y sigue en aumento. La Ilustración 29 es un barómetro de la electromovilidad en la que España registra una menor evolución del mercado electrificado y de mejora de la infraestructura de recarga pública menor a los líderes en la transición

¹ Representa la inversión realizada en el activo fijo.

energética, abanderada por los Países Bajos.

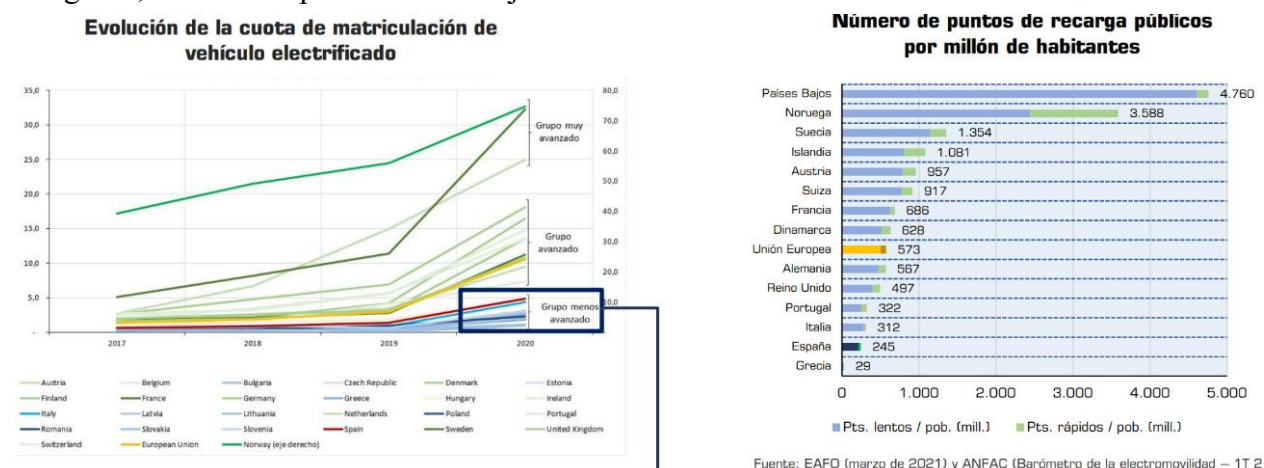


Ilustración 29. Barómetro electromovilidad en España [46]

La ANFAC ha desarrollado un proyecto de crecimiento de la infraestructura de recarga de acceso público [8]. Según el proyecto, se espera para 2030 un crecimiento del parque de turismos electrificados de hasta 35 veces, llegando a los tres millones de turismos. Es por ello por lo que los 11.517 puntos de carga de acceso público disponibles en el 2020 son escasos. Si se quiere cumplir con los objetivos de electrificación del parque establecidos por la Ley de Cambio Climático y en el PNIEC es necesario emplear mayor cantidad de herramientas y una solución es ampliar los puntos de carga de acceso público 30 veces más, hasta llegar a los 340.000 establecimientos.

Existen dos diseños de la red en función de su localización: electrolinerías en núcleos urbanos y electrolinerías para dar servicio a los principales corredores.

En primer lugar, se destinarán los recursos al desarrollo de electrolinerías en los núcleos urbanos. La red en núcleos urbanos planifica la construcción de 339.998 puntos de carga en las capitales de provincia y municipios con más de 100.000 habitantes. De estos puntos de carga tan solo un 2,3% son estaciones de alta potencia (>150kW) para la carga rápida.

Sin embargo, para cumplir con los objetivos se construirá 3.121 puntos de carga en los principales corredores y rutas con mayor Intensidad Media Diaria medida en vehículo/día y todos tendrán una potencia superior a los 250kW para evitar largas esperas en medio de las carreteras.

La Ilustración 30 es una representación de los puntos de carga de la REE prevista para 2030:

En comparación con las hidrogeneras, el volumen de construcción de electrolinerías es aproximadamente 2250 veces superior, esto es debido en parte al coste de fabricación de una electrolinería. A diferencia de las hidrogeneras, cuyo coste medio es alrededor de 1,5 y 3 millones de euros, las electrolinerías tienen un coste estimado entre los 60.000 y 250.000 euros. Además, un modelo de negocio de la Junta de Andalucía [28] basado en la creación de una electrolinería de autoservicio de estructura sencilla estima un período de retorno de 3 años, mientras que las hidrogeneras no garantizan un retorno de la inversión a corto plazo.

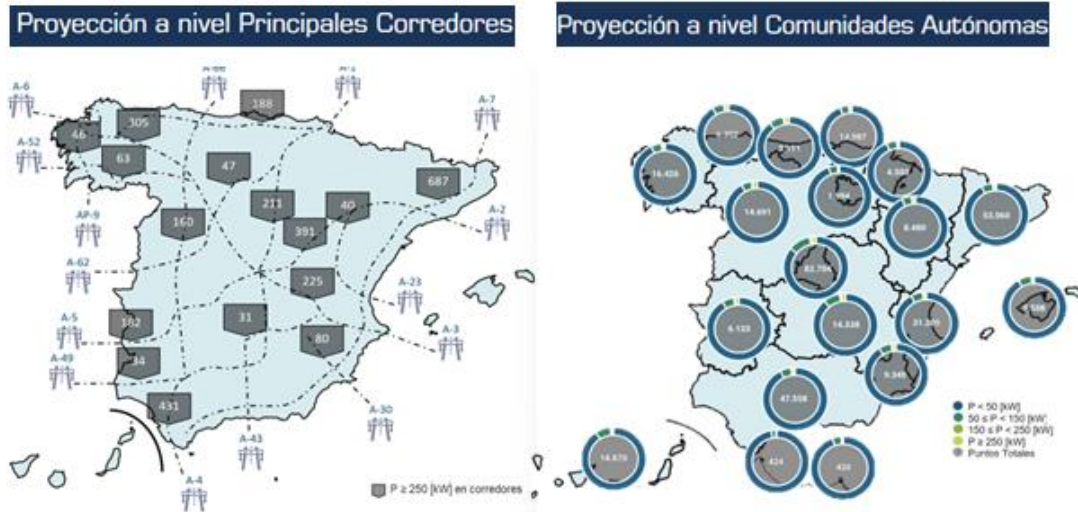


Ilustración 30. Mapa puntos de carga de la REE prevista para 2030 [8]

4.2. Financiación

Es necesario un gran volumen de recursos financieros públicos y privados en innovación tecnológica para cumplir con los objetivos de descarbonización de la economía. El Gobierno de España ha desarrollado el PNIEC 2021-2030. [39]

El Instituto para el Ahorro y la Diversificación Energética es la institución encargada de gestionar y estimar la información de las diferentes inversiones. Por un lado, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico estima las inversiones necesarias en los sectores energéticos, mientras que la Oficina Española del Cambio Climático se encarga de las inversiones de los sectores no energéticos.

4.2.1. Vehículos de hidrógeno

A pesar de que el hidrógeno renovable se encuentra en una fase inicial de desarrollo, es necesaria la intervención pública para estimular el uso de otras fuentes de energías renovables.

Con la vista puesta en el desarrollo de tecnología, conocimiento y nuevos modelos de negocio en el campo de energías verdes, el Gobierno de España ha aprobado la propuesta del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (ERHA) siguiendo los objetivos del PNIEC y que se centra en la innovación y la transición energética.

Una de las medidas transformadoras del PERTE ERHA es el Hidrógeno Renovable la cual estiman una inversión de 1.555 millones de euros del sector público por los 2.800 millones de euros del sector privado.

La inversión por parte de las Administraciones Públicas tiene cuatro líneas de actuaciones [40]:

Impulsar la cadena de valor innovadora y de conocimiento. Fomentar la colaboración de PYMEs globales altamente especializadas con centros tecnológicos y laboratorios de excelencia en el

conocimiento

- I. Impulsar la creación de un clúster de hidrógeno renovable para la integración sectorial que concentre espacialmente la producción, transformación y consumo a gran escala
- II. Desarrollar proyectos Singulares pioneros que permitan la introducción del hidrógeno renovable
- III. Realizar actuaciones de apoyo para integrar la cadena de valor nacional en la cadena de valor comunitaria

Mediante estas líneas de actuación se pretende rebajar el coste actual (3-8 €/kg²) de la producción de hidrógeno renovable mediante electrólisis a niveles de precio competitivos con otras fuentes de energía e integrar su consumo en los procesos industriales para llevar a cabo la transición energética.

4.2.2. Vehículos eléctricos

Para alcanzar los objetivos del PNIEC entre 2021-2030, se estima un presupuesto de 242.412. (Ver Tabla 9) El destino prioritario es la inversión en renovables con una cuota del 38%, le sigue el ahorro y eficiencia con un 35%, luego redes y electrificación con un 24%, y el resto de las medidas con un 3%.

Tabla 9. Inversiones por tipos de medidas 2021-2030, M€. (Gobierno de España, 2020.)

Inversiones por medidas	Coste (M€)
Ahorro y eficiencia	83.540
Electrificación y redes	58.579
Renovables	91.765
Otras medidas	7.528
TOTAL	242.412

Llama la atención en el informe la desproporción de ayudas por parte de las Administraciones Públicas. Según la Tabla 10 el 80% de las inversiones en nuestro país vienen del sector privado, mientras que tan solo un 20% vienen del sector público. La inversión europea financiada con fondos europeos se estima que pueda alcanzar alrededor del 5% de la inversión total.

² Según la AIE

Tabla 10. Inversiones por tipos de origen 2021-2030, M€. [39]

Inversiones por origen	Coste
Pública	50.900
Privada	190.511
TOTAL	242.412

Para estimar las inversiones a realizar en redes de transporte, interconexión y distribución; PNIEC ha usado informes de Deloitte (2018) y datos históricos de la REE. Las estimaciones dependen de forma directa del nivel de instalación de renovables (73 GW). La Tabla 11 muestra la inversión necesaria para las estimaciones para las inversiones en infraestructura de recarga de vehículos eléctricos se ha tenido en cuenta la tipología de puntos de carga y la cantidad de vehículos eléctricos en circulación.

Tabla 11. Inversiones en redes de transporte, distribución e infraestructura de recarga, 2021-2030, M€. [39]

	Coste
Transporte e interconexiones	8.975
Distribución y otros	22.667
Infraestructura recarga VE	9.918

Por último, según datos del modelo energético TIMES-SINERGIA entre los años 2021-2030 ha recogido las inversiones adicionales en electrificación en el sector del transporte. El cálculo de estas inversiones adicionales consiste en contabilizar la diferencia entre el coste de un BEV y su análogo de combustión interna convencional. Para los turismos la inversión adicional será de 384 millones de euros de los 14.899 millones de euros.

Existe una diferencia abismal entre ambos presupuestos debido a la madurez de la energía eléctrica. No obstante, España se encuentra en una situación privilegiada en la producción de energías renovables debido a la cantidad y calidad de recurso renovables. El Gobierno Español es consciente de la ventaja competitiva que dispone en el desarrollo del hidrógeno verde y, aunque el importe de inversión es menor al del vehículo eléctrico por menor madurez tecnológica, mantiene un esquema de inversiones, debido a sus ventajas competitivas, las cuales se han ido desarrollando a lo largo del trabajo

4.3. Emisiones

El informe [45] los datos de emisiones nacionales de los últimos 30 años (1990-2020). En 2020 se estima en 274,7 millones de CO₂-eq, esto supone tan solo una reducción del 5.3% respecto a 1990; sin embargo, si se observa la Ilustración 31 se observa una tendencia reduccionista de los GEI desde 2007.

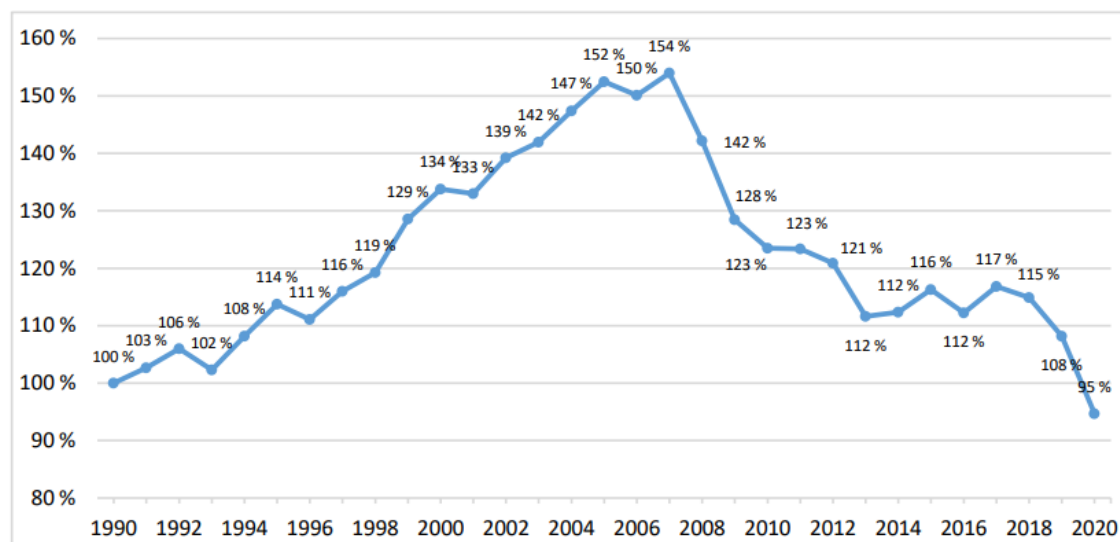


Ilustración 31. Evolución GEI en España [45]

Otro objeto de estudio del informe es el origen de los GEI, según el sector. En 2020, los tres sectores con mayor peso de emisiones son el transporte (27%), industria (20,8) y generación eléctrica (11,8%) llegando a generar prácticamente el 60% en el global de emisiones.

En la actividad del transporte de energía renovable para calcular la huella del carbono hay que tener en cuenta:

- I. Emisiones relacionadas con los materiales de fabricación
- II. Emisiones relacionadas con la producción del combustible/electricidad

4.3.1. Vehículos de hidrógeno

A pesar de que los FCEV no emiten GEI mientras se usan, contaminan en la medida que los métodos de extracción de los materiales de sus componentes, así como la producción de hidrógeno, no son procesos de cero emisiones

Recientemente, el Consejo Internacional de Transporte Limpio [10] ha desarrollado un proyecto de investigación comparativo global del ciclo de vida de las emisiones de GEI. El informe recomienda la energía de hidrógeno como única alternativa real a la electricidad para reducir los GEI para conseguir los objetivos del Acuerdo de París.

El ciclo del vehículo considera las emisiones de GEI de la producción y mantenimiento. En el caso de los vehículos de hidrógeno las emisiones de GEI corresponden prácticamente al tanque de hidrógeno y la pila de combustible. Con los procesos de reciclaje actualmente, sin embargo, las emisiones de GEI del sistema de hidrógeno podría reducirse en el futuro.

Uno de los mayores desafíos en la reducción de emisiones del hidrógeno es el método de producción. Alrededor del 95 % de la producción actual del hidrógeno consiste en el reformado de hidrocarburos fósiles, sin embargo, la producción de hidrógeno mediante electrólisis que no produce emisiones sigue en auge gracias a las políticas existentes.

La Ilustración 32 muestra la comparativa del uso de energía del ciclo de vida estimado entre los vehículos de combustión interna y de hidrógeno mediante electrólisis.

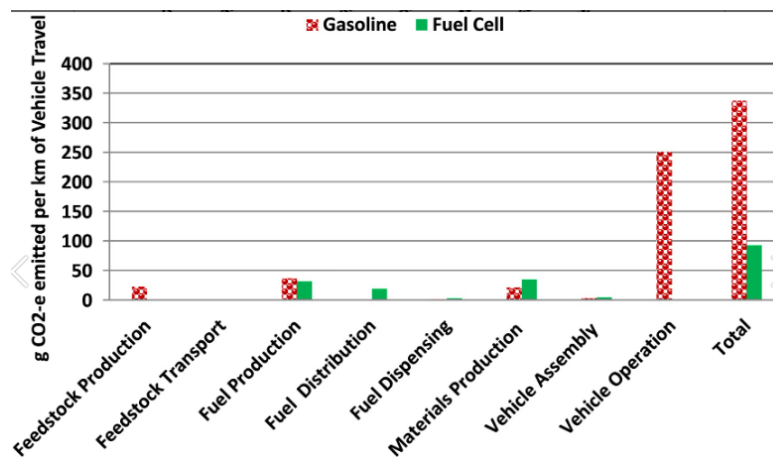


Ilustración 32. Comparativa ICE vs FCEV de los GEI emitidos en el ciclo de vida [4]

Los resultados muestran que las emisiones de producción de hidrógeno mediante electrólisis son inferiores a las de combustibles fósiles, sin embargo, es fundamental tener en cuenta la fuente de electricidad en cada ubicación geográfica. Asimismo, los FCEV emiten un 36% menos de GEI que los eléctricos. [4]

Adicionalmente, el informe del Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones de la Atmósfera [45] calcula que las emisiones de producción de hidrógeno son 884,45 de CO₂-eq (kt) en el 2019, una reducción del 0,7% en comparación con 2010. El motivo de la poca reducción de emisiones en la producción de hidrógeno se debe a la poca inversión que ha habido en la última década, sin embargo, las nuevas tendencias políticas motivan a un gran cambio en este aspecto.

4.3.2. Vehículos eléctricos

A pesar de que los BEV no emiten GEI mientras se usan, contaminan. Los métodos de extracción de los materiales que componen sus baterías, así como la electricidad con la que se recargan, no son procesos de cero emisiones.

El informe de Consejo Internacional de Transporte Limpio (Bieker, s.d.) ha demostrado que pese a no estar exento de emisiones al final de su vida útil, son una alternativa más sostenible a los vehículos convencionales. El estudio tuvo en cuenta el ciclo de vida de ambos vehículos: manufacturación, mantenimiento, producción combustible/electricidad y políticas verdes.

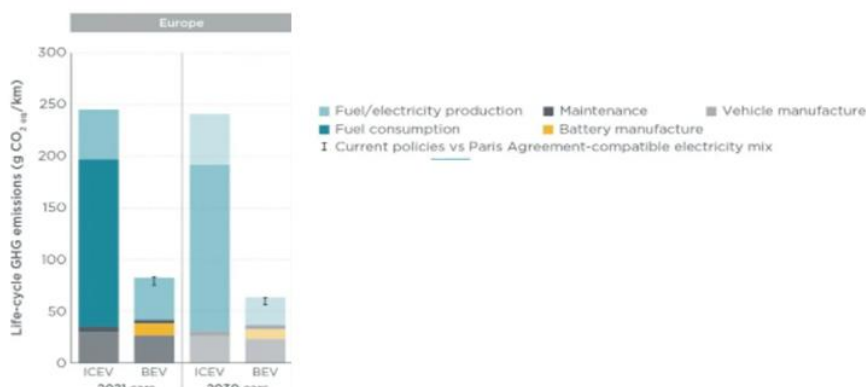


Ilustración 33. Comparativa ICE vs BEV de los GEI emitidos en el ciclo de vida [10]

Como se muestra en la Ilustración 33 hoy en día las emisiones de BEV ya son inferiores a los convencionales en un 70% y se espera una reducción de aproximadamente del 75% para 2030.

Según otro informe de Volvo [50], las emisiones de un BEV cuando llega al concesionario es un 70% más alto en comparación con su análogo de combustión interna. Sin embargo, la recarga de electricidad marca la victoria de emisiones por parte de los eléctricos.

El informe de Consejo Internacional de Transporte Limpio detalla la cantidad de emisiones de CO₂-eq en la fabricación de diferentes baterías de litio (Ver Tabla 12).

Tabla 12. Emisiones baterías BEV [10]

Tipo de batería de litio	Kg CO ₂ -eq/kWh en Europa
NMC622	54
NCA	57
LFP	34-39

Adicionalmente, el informe del Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones de la Atmósfera calcula que las emisiones de producción de servicio público de electricidad y calor son 32.469 de CO₂-eq (kt) en el 2020, una reducción del 26.35% en comparación con 2019.

4.4. Autonomía

Desde el 2019, WLTP, es la institución reguladora que define la autonomía homologada de cada vehículo ligero (< 3,5 toneladas). Es ineludible valorar los factores que influyen en la autonomía real de un BEV. En general se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- I. Cartografía: En función de las condiciones del asfalto, si el terreno tiene muchas curvas o pendientes, el esfuerzo del vehículo se verá condicionado
- II. Estilo de conducción: Los hábitos de conducción influyen en el consumo indudablemente. Estilos más agresivos y a mayor velocidad, se traducen en gasto energético mayor.
- III. Neumáticos: En caso de estar desinflados, el consumo energético será mayor
- IV. Peso: La carga transportada influye notablemente en el consumo energético.

4.4.1. Vehículos de hidrógeno

La mayor ventaja competitiva de los FECV con respecto a los BEV es la autonomía. Esto se debe a que el hidrógeno es el combustible con mayor contenido energético por unidad de masa, 25 kWh/kg frente a 200 Wh/kg de las baterías [32]. Esta diferencia permite disponer de una mayor autonomía.

A parte de los factores que se tiene en cuenta em el apartado 2.5, en los vehículos de hidrógeno se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- I. Presión en los tanques: La capacidad de los tanques no depende únicamente de su volumen, también de la cantidad de combustible que puede almacenar. Para aumentar la cantidad de combustible, la única vía es aumentando la presión de los tanques
- II. Tipo de pila de combustible: Dentro de los diferentes tipos de pilas de combustible más comunes (Tabla 4), éstas pueden tener diferentes propiedades en función del electrolito utilizado.

A pesar de no haber una gran variedad de vehículos en el mercado, la autonomía media de los mismos según WLTP es de 650 km. Sin embargo, esto es una medición teórica ya que el Toyota Mirai logró superar la barrera de los 1000 km en un solo depósito. [12]

4.4.2. Vehículos eléctricos

Uno de los mayores desafíos en la electromovilidad ha sido la autonomía. Por ello, desde sus orígenes, las empresas invierten en I+D+i para dar con la fórmula que aumente notablemente la autonomía de los vehículos, como, por ejemplo: implementación de placas solares en el techo.

A parte de los factores que se tiene en cuenta en el apartado 3.5, en los vehículos eléctricos se deben tene en cuenta los siguientes factores:

- I. Clima: La batería debe estar a una temperatura adecuada para el correcto funcionamiento del vehículo. Los climas extremos hacen que el piloto utilice la calefacción o el aire acondicionado según la estación del año. Por consiguiente, la batería alimenta un calefactor térmico especial, reduciendo así su autonomía.
- II. Tipo de batería: Dentro de los diferentes tipos de batería más comunes (Tabla 6), éstas pueden tener diferentes capacidades. A mayor capacidad, mayor autonomía.

Con todo dicho, el informe de WLTP estima en 343 km la autonomía media de los coches eléctricos, muy por debajo de los coches de hidrógeno.

Sin embargo, los siguientes BEV se encuentran a la venta en España y tienen una autonomía superior a los 400 km.

Tabla 13. Catálogo BEV con mayor autonomía (Elaboración propia)

	Modelo	Autonomía
1	Mercedes-Benz EQS 450+	de 563 km a 649 km
2	Tesla Model 3 Long Range (*)	de 469 km a 568 km
3	Tesla Model Y Long Range (*)	de 449 km a 533 km
4	Ford Mustang Mach-E RWD Rango Extendido (*)	de 488 km a 533 km
5	BMW iX xDrive50	de 491 km a 528 km

No obstante, la mayoría de estos vehículos son eléctricos de rango extendido (*), es decir, son vehículos alimentados por la energía de una batería que cuentan con un pequeño motor de combustión para recargar la batería. El problema es que este tipo de vehículos emiten GEI debido a su motor térmico y requieren un constante mantenimiento.

4.5. Legislación

Las políticas y la legislación que adopte el Gobierno de España afectarán tanto a los ciudadanos como a las empresas. Gracias a la legislación se pueden establecer un conjunto de normas y reglas para regular el desarrollo de las tecnologías eléctricas y de hidrógeno.

4.5.1. Vehículos de hidrógeno

El Subgrupo de Trabajo sobre el Hidrógeno del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (MICT) realizó un informe [16] sobre el estado de reglamentación y normalización de las diferentes fases para el desarrollo de la utilización del hidrógeno como vector energético.

- El informe recoge que la producción de hidrógeno está considerada como una actividad industrial sin importar el método de producción, al clasificarse como una industria química para la producción de gas inorgánico según la Ley 16/20002, de 1 de julio. Esta calificación restringe la construcción de este tipo de infraestructuras en suelo no calificado como industrial.
- Las medidas de seguridad del almacenamiento de hidrógeno están reguladas por el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ 0 a 10, aprobados mediante el Real Decreto 656/2017, de 23 de junio. No obstante, este Decreto Ley no tiene en cuenta el almacenamiento de hidrógeno para

- instalaciones residenciales en caso de que se desarrolle la utilización de pilas de combustible para cubrir parte de la demanda de energía eléctrica o de climatización de los edificios.
- Los instaladores de hidrógeno deberán cumplir los requisitos establecidos en la ITC-ICG 05
 - La normativa del transporte de hidrógeno es diferente en función del sistema por el que se transporte. Cabe diferenciar tres sistemas:
 - I. Transporte por carreteras: Está regulado por la norma ADR para el transporte de mercancías peligrosas, y es el mismo para los diferentes países de la UE.
 - II. Transporte a través de redes de gas natural: El comité de normalización (CEN/TC 234 Gas infrastructure) trabaja normalizar la inyección de hidrógeno a las redes de gas existentes, las cuales vienen reguladas por las Normas de Gestión Técnica del Sistema de la Ley 34/1998 de 7 de octubre.
 - III. Transporte a través de redes exclusivas de hidrógeno: el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, desarrollará reglamentariamente, con informe preceptivo de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, la normativa técnica necesaria para la utilización del hidrógeno en conductos exclusivos
 - La homologación de vehículos está regulada por normativa europea, la cual solo establece requisitos previos a la matriculación. Actualmente, el hidrógeno está homologado únicamente para los vehículos categorías M y N.
 - La fabricación de las pilas de combustible está regulada por las normas UNE-EN 62282

4.5.2. Vehículos eléctricos

- El marco regulatorio de las actividades de transporte y operación del sistema están reguladas por la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, para así garantizar el suministro de energía eléctrica y poder adecuarlo a las necesidades de los consumidores en términos de seguridad, calidad, eficiencia, objetividad, transparencia y al mínimo coste. [43]
- La Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia es la institución responsable de regular los parámetros retributivos, la metodología, la base regulatoria de activos, la remuneración anual del transporte y de la operación del sistema después de ser aprobado por el Real Decreto-Ley 1/2019, de 11 de enero. [43]
- Las infraestructuras de recarga de un vehículo eléctrico definido como el conjunto de dispositivos físicos y lógicos, destinados a la recarga de vehículos eléctricos están diseñados conforme a lo indicado en el Real Decreto-Ley 1053/2014 que establece las características mínimas de infraestructura de recarga de vehículo eléctrico asociadas tanto a edificaciones como a estacionamientos no adscritos a edificaciones. El pasado 14 de junio de 2022 el Consejo de Ministros aprobó el Real Decreto que establece la dotación mínima de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos con la que deben contar los edificios nuevos y las intervenciones en edificios existentes. [34]
- La homologación de vehículos está regulada por normativa europea, la cual solo establece requisitos previos a la matriculación. Actualmente, los automóviles eléctricos están homologados para los vehículos categorías M, N, L y O

- Liderar el sector de las baterías es uno de los mayores objetivos de la UE, que aspira a producir un tercio de la producción mundial en 2030. Por este motivo, en el año 2021 se introdujo trece nuevas medidas en el Reglamento comunitario 2019/2020 para promover un contexto de incentivos, impulsar la economía circular asociada a la industria europea de baterías y minimizar los impactos ambientales y sociales [23]

5 CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo he presentado las dos tecnologías; hidrógeno y electricidad, por las que apuesta el sector de automoción para dejar atrás la propulsión a través de motores de combustibles fósiles.

He explicado los elementos que conforman ambas tecnologías, su nivel actual de desarrollo y las tendencias y futuros desarrollos. Ambas tecnologías no se encuentran en el mismo nivel de explotación comercial y esto queda demostrado en su presencia en el mercado. El vehículo eléctrico está mucho más consolidado y las unidades vendidas, así como el número de fabricantes y modelos es muy superior a los motores de pila de combustible.

En el estudio también he realizado un análisis comparativo de las principales características de ambas tecnologías. El motor eléctrico se basa en un modelo de acumulación de energía eléctrica producida por los sistemas de generación de electricidad tradicionales, mientras que la tecnología de hidrogeno, a través de la pila de combustible, obtiene energía eléctrica a partir de la energía química que se produce entre el hidrógeno y el oxígeno. Esa energía eléctrica, acumulada o generada, es aprovechada para convertirla en energía mecánica.

Diez años han pasado desde que el fabricante Tesla comenzara a entregar las primeras unidades de la primera berlina eléctrico de lujo en el mundo. En la actualidad los fabricantes de automóviles han asumido que el futuro es eléctrico y tienen planes para abandonar por completo en las próximas décadas el montaje de vehículos de combustión

Si bien el motor eléctrico está ganando la partida a la tecnología de hidrógeno en turismos, cada vez más surgen estudios de los propios fabricantes sobre la huella de carbono de los vehículos eléctricos respecto a los tradicionales de combustión eléctrica. Destaca un informe [50] que Volvo realizó sobre la huella de carbono del modelo C40 Recargable, donde concluye que construir un coche eléctrico contamina un 70% más que el mismo modelo de gasolina, esta diferencia se recupera durante la vida útil del vehículo si el origen de la electricidad que utiliza en sus recargas es de origen renovable, si no lo es la mayor huella de carbono de uno u otro vehículo dependerá del kilometraje que se haga con el mismo.

La tecnología de hidrógeno, si el origen de la electricidad es de origen renovable, no se generan elementos contaminantes en el proceso. Además, los modelos comerciales ofrecen una mayor autonomía media y se repostan en cuatro o cinco minutos, de forma similar a lo que tarda el repostaje de un motor de combustión tradicional. Sin embargo, existe un freno importante a la popularización de esta tecnología, y este proviene del coste asociado al almacenamiento del hidrógeno, que requiere una presión no inferior a los 350 bares.

Al final ambas tecnologías tienen un factor limitativo común, el almacenamiento. En el caso del motor eléctrico, el almacenamiento de la energía eléctrica se realiza en baterías, que en la actualidad tienen una vida útil limitada a 5-7 años, un rendimiento decreciente y en su fabricación hay elevada producción de CO₂. En el caso de motor de hidrógeno, la clave es el almacenamiento del combustible (hidrógeno), que debe realizarse a baja temperatura y alta presión.

Toda la industria automovilística está invirtiendo enormes cantidades en I+D+i en busca de ese descubrimiento que convierta en determinante la ventaja de una tecnología respecto a otra. Un

ejemplo lo tenemos en el anuncio que el grupo chino GAC que ha presentado una nueva batería capaz de ofrecer cargas ultrarrápidas y promete hasta 1,5 millones de kilómetros de vida útil. Otro ejemplo, en este caso de avance del almacenamiento de hidrógeno, lo podemos encontrar en el anuncio que realizó Daimler, apostando por el repostaje de hidrógeno líquido, maximizando la densidad energética y acumulando más hidrógeno en un depósito del mismo tamaño

Los vehículos con tecnología de hidrógeno y los eléctricos sin duda convivirán, como lo hicieron los motores de gasolina y diesel. Al final, la existencia de dos tecnologías no hace sino impulsar una mejora continua de las mismas. En los años 80, del siglo pasado, el motor diesel era utilizado básicamente por profesionales del transporte asociado a la resistencia de los motores y al bajo consumo, mientras que el vehículo de gasolina se reservaba al uso privado por la mayor aceleración, y menor sonoridad. Con el paso del tiempo ambos motores tuvieron una convergencia en sus prestaciones, ya que cada una buscaba evolucionar sus motores con las características del otro motor que demandaban sus clientes.

De forma análoga la coexistencia de las dos tecnologías, el hidrógeno y la eléctrica, nos asegura el desarrollo de mejores y más eficientes motores.

6 REFERENCIAS

- [1] ACEA. (2022) Fuel types of new cars. Recuperado 26 de junio de 2022. [https://www.acea.auto/fuel-
pc/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-10-0-hybrid-25-1-and-petrol-36-0-market-share-in-q1-2022/](https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-10-0-hybrid-25-1-and-petrol-36-0-market-share-in-q1-2022/)
- [2] Aguado Alonso, M. (2021). Hidrógeno verde: La posición estratégica de España y la UE | Agenda Pública. Recuperado 26 de junio de 2022, de [https://agendapublica.elpais.com/noticia/17409/hidrogeno-
verde-posicion-estrat-gica-espana-ue](https://agendapublica.elpais.com/noticia/17409/hidrogeno-verde-posicion-estrat-gica-espana-ue)
- [3] Aguado Molina et al. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: El futuro de la energía eléctrica. Servicio de Publicaciones.
- [4] Ahmadi, P., & Kjeang, E. (2017). Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Energy Research*, 41(5), 714-727. <https://doi.org/10.1002/er.3672>
- [5] ANFAC. (2021). 10 medidas para acelerar el despliegue de los vehículos de hidrógeno en España. Recuperado 9 de mayo, de [https://anfac.com/actualidad/notas-y-comunicados-generales/10-medidas-
para-acelerar-el-despliegue-de-los-vehiculos-de-hidrogeno-en-espana/](https://anfac.com/actualidad/notas-y-comunicados-generales/10-medidas-para-acelerar-el-despliegue-de-los-vehiculos-de-hidrogeno-en-espana/)
- [6] ANFAC (2021) Plan despliegue de red mínima de hidrogenas. [https://anfac.com/wp-
content/uploads/2021/06/PLAN-DESPLIEGUE-DE-RED-MINIMA-DE-HIDROGENERAS_-
ANFAC_GASNAM.pdf](https://anfac.com/wp-content/uploads/2021/06/PLAN-DESPLIEGUE-DE-RED-MINIMA-DE-HIDROGENERAS_-ANFAC_GASNAM.pdf)
- [7] ANFAC (2021). Informe matriculaciones 2021 [https://anfac.com/wp-content/uploads/2022/01/Informe-
Matriculaciones-FFEE-CCAA-Diciembre-2021.pdf](https://anfac.com/wp-content/uploads/2022/01/Informe-Matriculaciones-FFEE-CCAA-Diciembre-2021.pdf)
- [8] ANFAC. (2021). Mapa de despliegue de Infraestructura de Recarga Pública 2021-2030. [https://anfac.com/wp-content/uploads/2021/07/Mapa-de-despliegue-de-Infraestructura-de-Recarga-
Pu%CC%81blica-2021-2030.-ANFAC-FACONAUTO.pdf](https://anfac.com/wp-content/uploads/2021/07/Mapa-de-despliegue-de-Infraestructura-de-Recarga-Pu%CC%81blica-2021-2030.-ANFAC-FACONAUTO.pdf)
- [9] Badía, C. F.-B. (2005) "Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro." [Trabajo fin de grado, Universidad de Sevilla]
- [10] Bieker, G. (2021). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars, International Council on Clean Transportation Europe, [https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-
combustion-engine-and-electric-passenger-cars/](https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/)
- [11] Consejo de Ministros. (2021). El Gobierno aprueba el PERTE de energías renovables, hidrógeno renovable y almacenamiento, que movilizará una inversión superior a 16.300 millones de euros. [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-el-perte-de-
energ%C3%ADas-renovables-hidr%C3%B3geno-renovable-y-almacenamiento-que-
movilizar%C3%A1-una-inversi%C3%B3n-superior-a-16.300-millones/tcm:30-534032](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-el-perte-de-energ%C3%ADas-renovables-hidr%C3%B3geno-renovable-y-almacenamiento-que-movilizar%C3%A1-una-inversi%C3%B3n-superior-a-16.300-millones/tcm:30-534032)
- [12] Daniel Murias. (2021). ¡Nuevo récord de autonomía! El Toyota Mirai de hidrógeno golpea al Hyundai Nexu superando los 1.000 km con un solo repostaje. Recuperado 25 de junio de 2022, de [https://www.motorpasion.com/toyota/nuevo-record-autonomia-toyota-mirai-hidrogeno-golpea-al-
hyundai-nexo-superando-1-000-km-solo-repostaje](https://www.motorpasion.com/toyota/nuevo-record-autonomia-toyota-mirai-hidrogeno-golpea-al-hyundai-nexo-superando-1-000-km-solo-repostaje)
- [13] Deloitte, "Hydrogen and fuel cell solutions for transportation", Fueling the future of mobility, vol 1, pp. 5-35. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the->

future-of-mobility-en-200101.pdf

- [14] Deloitte (2018.). Hacia la descarbonización de la economía: la contribución de las redes eléctricas a la transición energética. Monitor Deloitte. pp. 5-21.
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/estrategia/Deloitte-ES-descarbonizacion-redes-electricas-transicion.pdf>
- [15] Díaz, J. (2022). La tecnología que acabará con el coche eléctrico cada vez más cerca. ElConfidencial. Recuperado 16 de mayo de 2022, de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-02-10/coche-hidrogeno-baterias-tesla_3372488/
- [16] Dirección general de industria y de la pequeña y mediana empresa. (2019). Informe sobre la Reglamentación actual y necesidades de desarrollo Legislativo. <https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/tecnologia-hidrogeno/informacion/informe-reglamento-desarrollo-legislativo.pdf>
- [17] Ehsani, M. et Al. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles (Tercera edición). CRC Press
- [18] Endesa. (s.f.). Energía limpia para todos los vehículos eléctricos. Enel X. Recuperado 11 de mayo de 2022, de <https://www.enelx.com/es/es/historias/2021/distribuidor-energia-electrica>
- [19] Energía y Sociedad. (s.f.). La eficiencia energética del vehículo eléctrico. Recuperado el 11 de mayo de 2022, de <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>
- [20] Fernández Landa, C. (2021). El hidrógeno, un mercado tan prometedor como inmaduro. Ideas PwC. Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://ideas.pwc.es/archivos/20211001/el-hidrogeno-un-mercado-tan-prometedor-como-inmaduro/>
- [21] Fortune Business Insight. (2020). Electric Vehicle (EV) Battery Market Size, Share | Forecast, 2028. Recuperado 5 de mayo de 2022, de <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/electric-vehicle-battery-market-101700>
- [22] García, G. (2021). Tesla eleva al 97% la eficiencia de sus motores eléctricos gracias al inversor de carburo de silicio. Híbridos y Eléctricos. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/tesla-eleva-97-eficiencia-motores-electricos-inversor-carburo-silicio/20210226133128042892.html>
- [23] Gisbert, N. (2021). La UE actualiza su marco normativo para el gran desembarco del sector de baterías. Recuperado 27 de junio, de <https://cicenergigune.com/es/blog/UE-marco-normativo-sector-baterias>
- [24] García, G. (2021). Ample propone un intercambio de baterías compatible con todos los coches eléctricos del mercado. Recuperado 23 de junio, de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/ample-intercambio-baterias-compatible-todos-coches-electricos-mercado/20210305144508043066.html>
- [25] García, G. (2019) Los coches eléctricos pierden 80 kilómetros de autonomía con el nuevo ciclo WLTP. Recuperado 20 de mayo de 2022, de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/coches-electricos-pierden-80-kilometros-autonomia-nuevo-ciclo-wltp/20191203112100031878.html>
- [26] Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- [27] Jimeno, C. L. (s.f.) La electricidad: el recorrido de la energía. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid (19), pp. 4-16. <https://www.fenercom.com/wp->

- content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-la-electricidad.pdf
- [28] Junta de Andalucía (s.f.) Electroliner. Recuperado 17 de mayo de 2022, de <http://www.bancodeproyectos.andaluciaemprende.es/sites/default/files/guias/473002%20Electroliner.pdf>
- [29] Leonardo, P., & Gül, T. (2022). Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales. Recuperado 26 de junio de 2022, de <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>
- [30] López-Tafall, J. " Automoción, descarbonización y economía ", Economistas, núm 172, 2022, pp. 68-75.
- [31] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022) Informe de inventario nacional gases de efecto invernadero. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-es_nir_edicion2022_tcm30-523942.pdf
- [32] Marc Amblard. (2021). Hydrogen's Future Role in Mobility. Recuperado 20 de mayo de 2022, de <https://www.autonomy.paris/hydrogens-future-role-in-mobility/>
- [33] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021). Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno verde. https://energia.gob.es/es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf
- [34] MITMA. (2022). El Gobierno aprueba una norma que exige una infraestructura mínima en las edificaciones para la recarga de vehículos eléctricos. Recuperado 27 de junio de 2022, de <https://www.mitma.gob.es/el-ministerio/sala-de-prensa/noticias/mar-14062022-1713>
- [35] Munoz, F. (2022). El coche de hidrógeno está vivo: Sus ventas crecieron un 84% en 2021. Recuperado 9 de mayo de 2022, de <https://es.motor1.com/news/573759/ventas-coches-hidrogeno-mercado-2021>
- [36] Nations, U. (s.f.) ¿Qué es el cambio climático? Recuperado 29 de marzo de 2022, de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- [37] Parlamento Europeo. (2022). Emisiones de CO2 de los coches: Hechos y cifras. Recuperado 29 de marzo de 2022, de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- [38] Pasquale Corbo et al. (2011). Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles. Springer-Verlag London Limited. <http://www.myilibrary.com?id=308331>
- [39] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021). Impacto económico, de empleo, social y sobre la salud pública 2021-2030. https://www.miteco.gob.es/images/es/informesocioeconomicopnieccompleto_tcm30-508411.pdf
- [40] Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. (2021) Hidrógeno renovable: un proyecto país. <https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documents/16062021-Componente9.pdf>
- [41] PricewaterhouseCoopers. (2022). Electric Vehicle Sales Review Full Year 2021. Recuperado 26 de junio 2022, de <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/automotive/electric-vehicle-sales-review-full-year-2021.html>
- [42] PricewaterhouseCoopers. (2018). En 2030, Europa tendrá 80 millones de coches menos como consecuencia del transporte compartido y de la digitalización. Recuperado 29 de marzo de 2022, de <https://www.pwc.es/es/sala-prensa/notas-prensa/2018/2030-europa-ochenta-millones-menos-coches.html>

- [42] Red Eléctrica de España. (2020.) Informe del Sistema Eléctrico Español. https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/05/downloadable/inf_sis_elec_ree_2020_0.pdf
- [43] Red Eléctrica de España (2022). Marco regulatorio. Recuperado 27 de junio de 2022, de <https://www.ree.es/es/conocenos/marco-regulatorio>
- [44] Serrano, M. "La transición energética en el sector eléctrico", *Economistas*, núm 172, 2022, pp. 57-67.
- [45] Sistema Español de Inventario de Emisiones. (s.f.) Producción de hidrógeno. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040416-prod-hidrogeno_tcm30-529534.pdf
- [46] Trashorras Montecelos, J. (2019). Vehículos eléctricos: Infraestructura para la recarga, componentes de electricidad y electrónica, esquemas eléctricos, seguridad eléctrica para la electromovilidad. Paraninfo.
- [47] Valle, D. (2021). Los riesgos del hidrógeno. Recuperado 28 de abril de 2022, de <https://elperiodicodelaenergia.com/los-riesgos-del-hidrogeno/>
- [48] Verdagy. (s.d.). Green Hydrogen Using Renewable Energy & Water. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://verdagy.com/>
- [49] Verne, J. (2007). Construyen un ascensor y fabrican el cristal. *La isla misteriosa* (pp.336). Edhasa.
- [50] Volvo (2021). Informe emisiones de carbono. <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>
- [51] World Energy Trade. (2021). Impulso en la demanda de litio sitúa al mundo ante una crisis de suministro. World Energy Trade. Recuperado 12 de mayo de 2022, de <https://www.worldenergytrade.com/metales/litio/impulso-en-la-demanda-de-litio-situa-al-mundo-ante-una-crisis-de-suministro>
- [52] World Energy Trade. (2022). La nueva tecnología de almacenamiento de hidrógeno podría aumentar la eficiencia energética. Recuperado 16 de mayo de 2022, de <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/investigacion/nueva-tecnologia-almacenamiento-hidrogeno-eficiencia-energetica>