

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Estado del arte de la descarbonización del sector
transporte mediante la tecnología del hidrógeno

Autor: Leticia Álvarez Morales

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Estado del arte de la descarbonización del sector transporte mediante la tecnología del hidrógeno

Autor:

Leticia Álvarez Morales

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

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

Trabajo Fin de Grado: Estado del arte de la descarbonización del sector transporte mediante la tecnología del hidrógeno

Autor: Leticia Álvarez Morales

Tutor: Francisco Javier 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

A mis amigos

Agradecimientos

A mi familia, y muy especialmente a mis padres por su gran apoyo. A mis compañeros por su ayuda durante estos años de carrera, y a todos los profesores de la carrera en especial a mi tutor, Francisco Javier Pino Lucena, que sin su ayuda no hubiera sido posible realizar este trabajo.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo fundamental analizar la situación actual de los combustibles fósiles, que si bien aportan el grueso de la energía utilizada para proporcionar iluminación, calefacción, refrigeración, suministro de agua, transporte, industria, etc, su uso desmesurado está produciendo un importante agotamiento de estos. Esta situación se ha visto enormemente agravada debido a la guerra de Ucrania, que ha provocado de manera repentina una subida desmesurada. De otra parte, el uso de los combustibles fósiles está teniendo una especial incidencia en el ámbito medio ambiental con especial repercusión en el cambio climático., lo que está generando una gran preocupación a nivel mundial.

La situación descrita, que no deja de ser por menos que dramática, ha puesto de manifiesto, que se tengan que adoptar medidas con carácter de urgencia con el único propósito de eliminar o al menos tratar de reducir en la mayor proporción posible las emisiones de gases efecto invernadero, sustituyendo para ello el sistema de energía actual basado en la utilización de los combustibles fósiles, por un sistema energético basado principalmente en la utilización de fuentes de energía renovables.

Un dato importante a tener en cuenta es que, tanto en España como en la Unión Europea, el sector con mayor porcentaje de consumo energético es el transporte. Lo que exige a este sector la adopción de medidas más drásticas a corto y medio plazo para evitar los efectos nocivos que producen esos combustibles. El objetivo que se persigue es propulsar el hidrógeno para los vehículos como alternativa a los vehículos convencionales movidos por combustibles fósiles y ayudar a la descarbonización del sector del transporte.

En cuanto al uso del hidrógeno, a lo largo del trabajo, se ha dedicado un extenso apartado a las distintas fuentes de obtención de este elemento químico considerado como el más simple y abundante, así como a sus formas de almacenamiento y a su uso.

Merece ser destacado, con relación al uso que se le puede dar al hidrógeno, las pilas de combustible que son un dispositivo que permite generar electricidad a partir de la energía química del hidrógeno y el oxígeno sin que exista combustión, lo que la hace una de las de más alta eficiencia, permitiendo una amplia implementación del uso del hidrógeno en muchos sectores, como el transporte, o en sistemas de cogeneración de electricidad y calor para industrias o edificios.

Otro de los apartados de este trabajo ha estado dedicado al estudio y análisis de los vehículos movidos por hidrógeno y el vehículo eléctrico, habida cuenta que la situación actual que estamos viviendo con el agotamiento de los combustibles fósiles, el desorbitado aumento de precios de dichos combustibles y el cambio climático, han postulado a estos vehículos como la mejor alternativa para la sustitución de los vehículos de motores de combustión interna.

También el Sector del Transporte ha sido objeto de estudio en este trabajo. Pudiéndose destacar en este breve resumen que el hidrógeno funciona como combustible en los motores de combustión interna o a través de las pilas de combustible. La diferencia más importante es que en los ICE, aunque el hidrógeno

sea considerado renovable, al producirse la combustión a elevadas temperaturas se emiten gases contaminantes. Sin embargo, las FC son una técnica neutra en emisiones, la cuál es la que se implementa en los proyectos desarrollados en la actualidad y se han sido analizadas de forma más detenida.

Las soluciones basadas en el hidrógeno dependen de la necesidad de cada medio de transporte, pudiendo implementarse mediante distintas soluciones al transporte ligero o pesado, ya sea terrestre, marítimo o incluso aéreo.

Para concluir este trabajo, se ha dedicado un apartado a realizar una comparativa de los diferentes tipos de vehículos que se comercializan actualmente en España, analizando cuestiones técnicas, ambientales y económicas para poder llegar a la conclusión de que vehículo resultaría más rentable en todos los aspectos con las condiciones actuales del país.

Abstract

The main objective of this dissertation is to analyse the current situation of fossil fuels, which although they provide the bulk of the energy used to provide lighting, heating, cooling, water supply, transport, industry, etc., their excessive use is leading to a significant depletion of these fuels. This situation has been greatly aggravated by the war in Ukraine, which has led to a sudden and disproportionate increase. On the other hand, the use of fossil fuels is having a particular impact on the environment, with special repercussions on climate change, which is causing great concern worldwide.

The situation described above, which is no less than dramatic, has led to the adoption of urgent measures with the sole purpose of eliminating or at least trying to reduce greenhouse gas emissions as much as possible, replacing the current energy system based on the use of fossil fuels with an energy system based mainly on the use of renewable energy sources.

An important fact to bear in mind is that, both in Spain and in the European Union, the sector with the highest percentage of energy consumption is transport. This requires this sector to adopt more drastic measures in the short and medium term to avoid the harmful effects produced by these fuels. The aim is to promote hydrogen for vehicles as an alternative to conventional vehicles powered by fossil fuels and to help decarbonise the transport sector.

As regards the use of hydrogen, an extensive section has been dedicated throughout the work to the different sources for obtaining this chemical element, considered to be the simplest and most abundant, as well as to its forms of storage and its use.

It is worth highlighting, in relation to the use that can be made of hydrogen, fuel cells, which are a device that allows electricity to be generated from the chemical energy of hydrogen and oxygen without combustion, which makes it one of the most highly efficient, allowing the wide implementation of the use of hydrogen in many sectors, such as transport, or in electricity and heat cogeneration systems for industries or buildings.

Another section of this work has been dedicated to the study and analysis of hydrogen-powered vehicles and electric vehicles, given that the current situation we are experiencing with the depletion of fossil fuels, the exorbitant increase in the price of these fuels and climate change, have postulated these vehicles as the best alternative for the replacement of internal combustion engine vehicles.

The Transport Sector has also been the subject of study in this work. It can be highlighted in this brief summary that hydrogen works as a fuel in internal combustion engines or through fuel cells. The most important difference is that in ICEs, although hydrogen is considered renewable, combustion at high temperatures emits polluting gases. However, FCs are an emission-neutral technique, which is the one that is implemented in the projects currently being developed and has been analysed in more detail.

Hydrogen-based solutions depend on the needs of each means of transport and can be implemented by means of different solutions for light or heavy transport, whether by land, sea or even air.

To conclude this work, a section has been dedicated to a comparison of the different types of vehicles currently marketed in Spain, analysing technical, environmental and economic issues in order to reach the conclusion as to which vehicle would be more profitable in all aspects under the current conditions of the country.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice de tablas	17
Índice de Figuras	19
Notación	20
1 Introducción	23
1.1 Contexto histórico: El hidrógeno	23
1.2 Agotamiento de los combustibles fósiles	24
1.3 Necesidad de reducir las emisiones de CO ₂	26
1.4 Impacto del sector del transporte en el consume energético mundial	28
1.5 Objetivos	30
2 El Hidrógeno	31
2.1 La producción de hidrógeno	31
2.1.1 Procesos a partir de gas natural	31
2.1.2 Procesos a partir de agua	34
2.1.3 Otros procesos de obtención de hidrógeno	34
2.2 Almacenamiento	35
2.2.1 Tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.	35
2.2.2 Tanques de hidrógeno líquido	35
2.2.3 Materiales químicos	36
2.3 Usos del hidrógeno: La pila de combustible	36
2.3.1 Tipos de pila de combustible	38
2.3.2 Aplicaciones	41
3 VEHÍCULOS MOVIDOS POR HIDRÓGENO	43
3.1 Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV)	43
3.1.1 Estaciones de repostaje de hidrógeno	45
3.2 Vehículos eléctricos (EV)	47
3.2.1 Vehículo eléctrico de batería (BEV)	48
3.2.2 Vehículo híbrido eléctrico (HEV)	48
3.2.3 Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV)	48
3.2.4 Vehículo eléctrico de autonomía extendida (E-REV)	49
3.3 Vehículo de combustión interna (ICE)	49
4 Sector del transporte	51
4.1 Transporte terrestre	51
4.1.1 Transporte Terrestre Ligero	51
4.1.2 Transporte Terrestre Pesado	53
4.1.3 Transporte Marino y Fluvial	55
4.1.4 Transporte Ferroviario	57
4.1.5 Transporte Aéreo	59
5 Comparativa entre vehículos	63
5.1 Autonomía	63
5.2 Consumo y eficiencia	66
5.3 Precio del combustible	68
5.4 Tiempo de recarga	69
5.5 Infraestructura de recarga	70

5.6	<i>Emisiones</i>	72
5.7	<i>Precio</i>	75
6	Conclusión	78
	Bibliografía	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONSUMO DE ENERGÍA FINAL NACIONAL POR MEDIO DE TRANSPORTE EN TJ. FUENTE: (MITMA, 2020).....	29
TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LOS TANQUES PARA EL ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY)	35
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE CADA UNA DE LAS TECNOLOGÍAS DE PILA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY)	41
TABLA 4: RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE AUTONOMÍA PARA DIFERENTES MODELOS DE COCHES. FUENTE: (MOTOR1 NEWS) ...	64
TABLA 5: AUTONOMÍA Y CONSUMO PARA LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DEL HYUNDAI KONA. FUENTE: (HYUNDAI)	65
TABLA 6: AUTONOMÍA MEDIA PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA)	66
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES COMBUSTIBLES. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA)	69
TABLA 8: PRECIO DE 2022 DE LOS DIFERENTES COCHES HYUNDAI. FUENTE: (HYUNDAI)	75
TABLA 9: COSTES DEL CICLO DE VIDA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA)	77
TABLA 10: COSTE TOTAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA)	77

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PRODUCCIÓN GLOBAL DE COMBUSTIBLES FÓSILES. FUENTE: (INFORME SOBRE LA BRECHA DE PRODUCCIÓN 2021 RESUMEN, OBTENIDO DE PRODUCTIONGAP.ORG).....	25
FIGURA 2: FUENTES DE ENERGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO	31
FIGURA 3: MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO. FUENTE: (ICAI).....	31
FIGURA 4: PROCESO DE REFORMADO PARA LA FABRICACIÓN DE HIDRÓGENO. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY)	33
FIGURA 5: ESQUEMA DE LA GENERACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y USO FINAL DEL HIDRÓGENO. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY)	37
FIGURA 6: FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE. FUENTE (MOVILIDAD ELÉCTRICA OBTENIDO ELECTRICVEHICLESRESEARCH)	38
FIGURA 7: FUNCIONAMIENTO DE UN VEHÍCULO PROPULSADO POR HIDRÓGENO. FUENTE: (BMW).....	45
FIGURA 8: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS HIDROGENERAS E HIDROLINERAS. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY)	46
FIGURA 9: MAPA DE LA HIDROGENERAS EXISTENTES EN EL MUNDO. FUENTE: (H2STATIONS)	47
FIGURA 10: HYUNDAI NEXO. FUENTE: (HYUNDAI).....	52
FIGURA 11: OBJETIVOS DEL DESPLIEGUE DE AUTOBÚS DE HIDRÓGENO EN EUROPA. FUENTE: (FUNDACIÓN NATURGY).....	54
FIGURA 12: AUTOBÚS TOYOTA SORA. FUENTE: (TOYOTA).....	55
FIGURA 13: TECNOLOGÍA DE UN CAMIÓN PROPULSADO POR PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO. FUENTE:(HYUNDAI).....	55
FIGURA 14: CATAMARÁN ENERGY OBSERVER. FUENTE: (ENERGY OBSERVER)	57
FIGURA 15: FUNCIONAMIENTO DE UN TREN DE HIDRÓGENO. FUENTE: (EL CONFIDENCIAL).....	58
FIGURA 16: AVIÓN AIRBUS BWB. FUENTE: (AIRBUS)	60
FIGURA 17: AUTONOMÍA MEDIA Y MÁXIMA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN VENTA EN EEUU DESDE 2011. FUENTE: (HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS)	63
FIGURA 18: EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE VEHÍCULOS. FUENTE: (TRANSPORT AND ENVIROMENT).....	66
FIGURA 19: COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL VEHÍCULO CONVENCIONAL CON LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. FUENTE: (ENERGÍA Y SOCIEDAD)	68
FIGURA 20: INDICADOR DE INFRAESTRUCTURA DE RECARGA. FUENTE: (ANFAC).....	71
FIGURA 21: ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN ESPAÑA POR FUENTES DE ENERGÍA. FUENTE: (HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS)	73
FIGURA 22: ESQUEMA DE LAS EMISIONES QUE EMITEN LA GAMA DE VEHÍCULOS VOLVO. FUENTE:(VOLVO CARS)	74

NOTACIÓN

H_2	Hidrógeno
H_2O	Agua
CH_4	Metano
CO	Óxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
O_2	Oxígeno
UE	Unión Europea
TJ	Tera Julios
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
IEA	International Energy Agency
FC	Fuel Cell
GEI	Gases Efecto Invernadero
PEM	Proton Exchange Membrane
AFC	Alkaline Fuel Cells
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells
KOH	Hidróxido de potasio
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cells
Li	Litio
Na	Sodio
K	Potasio
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells
ICE	Internal Combustion Engines
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
EE.SS	Estación de Servicio
EV	Electric Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
DGT	Dirección General de Tráfico
E-REV	Extended Range Electric Vehicle
GNL	Gas Natural Licuado
GNC	Gas Natural Comprimido
TFCS	Toyota Fuel Cell System
CUTE	Clean Urban Transport for Europe
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
RFGI	Red Ferroviaria de Interés General
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
BWB	Blended-Wind Body
WLPT	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

EPA
ANFAC
AEMA

Environmental Protection Agency
Agrupación Nacional de Fabricantes de Automóviles y Camiones
Agencia Europea de Medio Ambiente

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto histórico: El hidrógeno

El hidrógeno, descubierto en 1766 por Henry Cavendish, y llamado así por Antoine Lavoisier en 1783, proviene de la unión de “hydro” (agua) y genes, esto es, generador de agua. Actualmente, se representa en la tabla periódica con el símbolo “H”, y constituye el elemento más abundante del universo (un 90% de su peso).

Más adelante, en 1800, William Nicholson descubrió que al emplear una corriente eléctrica en el agua se podía conseguir hidrógeno y oxígeno. Y, en 1838, Christian Friedrich Schönbein descubrió los inicios de la pila de combustible, esto es, la obtención de la electricidad a través de la combinación de oxígeno e hidrógeno. Si embargo, no fue hasta 1842 cuando se desarrolló la primera celda de combustible capaz de crear energía eléctrica.

El hidrógeno consiguió licuarse, por primera vez, gracias a James Dewar, en el año 1898, al usar refrigeración regenerativa.

Dejando a un lado su contexto histórico, y centrándonos en el hidrógeno como elemento químico, podemos afirmar que nos encontramos ante el más simple y pequeño, ya que se integra únicamente por un protón y un electrón.

Aunque, debido a su simplicidad estructural es el elemento que más abunda en el universo, en el planeta tierra se encuentra, únicamente, formando compuestos como el agua o los componentes de la mayor parte de las moléculas orgánicas, lo que obliga al desarrollo de la tecnología necesaria para separarlo de dichos compuestos.

Las propiedades fisicoquímicas del hidrógeno pueden aportarnos innumerables beneficios, convirtiéndose es un eslabón fundamental de la cadena de valor. Entre otras, podemos destacar las siguientes ventajas de este elemento:

- Es el único combustible que, durante su uso, no produce dióxido de carbono, debido a que su combinación con el oxígeno sólo produce agua.
- Al ser un combustible renovable, sus reservas son inagotables.
- Se puede almacenar físicamente de forma sencilla, como líquido, por ejemplo.

El hidrógeno se concibe, fundamentalmente, como un vector energético, y no como una fuente de energía primaria (como por ejemplo los combustibles fósiles) ya que, al encontrarse el hidrógeno principalmente en forma de agua, se utiliza como medio para almacenar y transportar energía.

Podemos encontrar diferentes tipos de hidrógenos, basando su clasificación en la materia prima necesaria y a las emisiones de CO₂ generadas para su obtención. Debido a su importancia, cabe destacar los siguientes tipos:

- Hidrógeno renovable o hidrógeno verde, es aquel que se genera a partir de electricidad renovable, utilizando el agua como materia prima, a través de un proceso de electrólisis, es decir, la separación de las moléculas de agua para obtener hidrógeno y oxígeno. Este tipo de hidrógeno supone un 1% de la producción a nivel mundial.
- Hidrógeno gris, obtenido a través de fuentes fósiles, como el gas natural u otros hidrocarburos ligeros (como el metano), pero sin capturar las emisiones contaminantes. En la actualidad, España consume un 99% de este tipo de hidrógeno.
- Hidrógeno azul, su obtención es muy similar a la del hidrógeno gris, pero con la diferencia de que, en este tipo, se emplean técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) que permiten reducir hasta un 95% de las emisiones de CO₂ que se generan durante el proceso.

A parte de lo anteriormente citados, podemos encontrar otros tipos de hidrógenos, como el hidrógeno negro o marrón (que sale de la materia prima del carbón, la energía nuclear o la electricidad de la red) que no se incluyen en la citada clasificación debido al impacto ambiental que genera en su producción y consumo.

1.2 Agotamiento de los combustibles fósiles

Los combustibles fósiles constituyen el desencadenante de la grave crisis climática que vivimos a nivel mundial, y cuyos efectos, cada vez más patentes, están teniendo una grave incidencia en las facetas más elementales de nuestra vida como son la salud, los alimentos, el agua, la vivienda.

Los combustibles fósiles aportan el grueso de la energía utilizada por los humanos para proporcionar iluminación, calefacción, refrigeración, suministro de agua, transporte, industria, etc.

El consumo de esta energía se ha visto incrementado considerablemente en las sociedades modernas en los últimos años, lo que ha producido y está produciendo un importante agotamiento de los combustibles fósiles, como más adelante analizaremos.

Este fenómeno ha trascendido el ámbito meramente científico, donde ya se venía advirtiendo sobre las consecuencias de la utilización masiva de estos combustibles, convirtiéndose en el centro de una polémica geopolítica, económica y social.

El uso de ellos ha tenido y tiene una especial incidencia en el ámbito medio ambiental con especial repercusión en el cambio climático, lo que está generando una gran preocupación a nivel mundial. Las actividades que generan gases de efecto invernadero son diversas, pero hoy día lo que más preocupa es la emisión de CO₂ asociada a la obtención de energía. Por consiguiente, el futuro de la emisión de estos gases dependerá de la evolución del uso que hagamos en mayor o menor medida de los combustibles fósiles.

La escasez de los combustibles fósiles y como consecuencia el aumento de la subida de los precios era una realidad, que ya se venía avanzando desde hacía tiempo y se ponía de manifiesto día a día, preocupando sobremanera a los gobiernos. No obstante, esta situación se ha visto enormemente agravada debido a la guerra de Ucrania, que ha provocado de manera repentina una subida desmesurada de los precios de estos combustibles y más importante, ha puesto de manifiesto que la dependencia de estos combustibles es por menos que insegura, inasequible e insostenible.

Se sabe que Europa depende en términos energéticos del gas, y dejar de comprar gas ruso conllevaría un importante impacto en la economía del país. Sin embargo, no podemos obviar, que Europa puede ser independiente energéticamente de cualquier país, pues es capaz de producir su propia energía, además 100% renovable. Pero los pasos hacia la transición energética, la búsqueda de energía alternativas, no terminan de ver la luz. Así pues, resulta absolutamente imprescindible a los fines pretendidos que la transición energética sea una realidad a la mayor brevedad.

En este apartado, conviene traer a colación por su interés, las Conferencias Energéticas (Cera), celebradas en Texas. En el desarrollo de estas conferencias los directores ejecutivos de las grandes petroleras y sus grupos de presión propusieron rápidamente elevar la producción de petróleo y gas, eliminar los límites de la producción, flexibilizar normativas y revertir políticas que apuntan a reducir las emisiones de dióxido de carbono. Sin embargo, estas propuestas venían a chocar frontalmente con la amenaza que estaba suponiendo el cambio climático y el calentamiento global. Esta situación fue puesta de manifiesto en el “Informe de brechas de producción” (‘Production Gap Report’) de 2021, desde se proponía precisamente lo contrario: “Tenemos que ir cerrando pozos y minas, reducir la producción, no añadir más capacidad”.

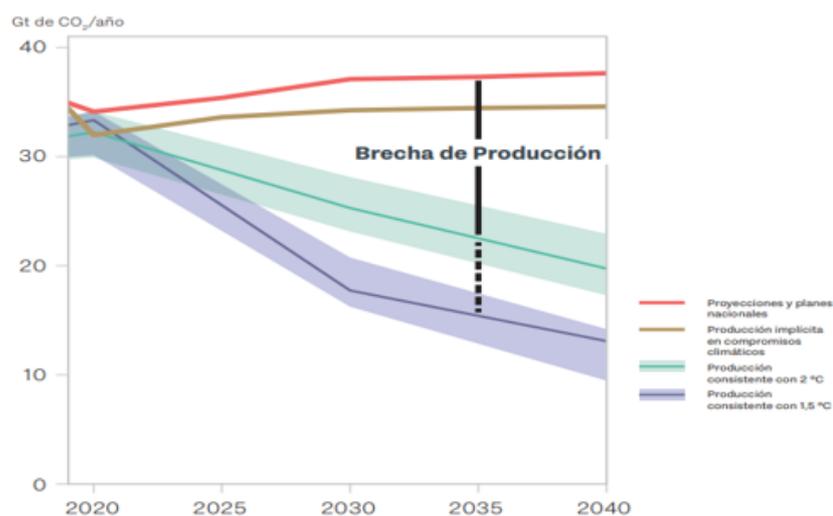


Figura 1: Producción global de combustibles fósiles. Fuente: (Informe sobre la Brecha de Producción 2021 Resumen, obtenido de productiongap.org)

No obstante, la realidad es otra, y es que el grupo de presión sobre combustibles fósiles y otras entidades se estén aprovechando del aumento de los precios del petróleo y el gas para promover un retroceso en las decisiones sobre la eliminación gradual de los combustibles fósiles o para ampliar estos combustibles en su ámbito local.

Estas políticas provocan un aumento de las emisiones de carbono, que inciden de una manera perjudicial en los derechos humanos, lo que provoca que los Estados Miembros vulneren e incumplan su obligación de protección de los derechos humanos.

Por ello, están obligados a garantizar que su población tenga acceso a una energía asequible, lo que les exige adoptar medidas e iniciativas que con carácter urgente que permitan el acceso a energías renovables.

En este sentido, merece especial mención, el informe sobre la mitigación del cambio climático, el que se hace un llamamiento sobre la urgente necesidad de reducir la utilización de los combustibles fósiles en aras a evitar un nivel de calentamiento global del planeta que tendría resultados desastrosos para la humanidad, ya que la instalación de persistentes infraestructuras de combustibles fósiles contribuye a consolidar las emisiones de gases de efecto invernadero.

El comentado informe, también señala que la eliminación de los subsidios para combustibles fósiles daría lugar a importantes reducciones de las emisiones, y a un aumento de los ingresos públicos. Por otra parte, refleja que los flujos financieros son entre tres y seis veces menores que los que se necesitarán en 2030 para limitar el calentamiento a un nivel por debajo de 1,5°C o 2°C, especialmente en los países en desarrollo, pese a que existe suficiente capital global y hace hincapié en la necesidad de que se acelere la cooperación económica internacional.

Del comentado informe merece ser destacado, un aspecto del que deberíamos tomar conciencia, y es que cuanto más rápidamente se lleve a cabo la eliminación gradual de los combustibles fósiles y se adopten medidas para reducir el consumo de energía, menor será la necesidad de un despliegue a gran escala de mecanismos para eliminar el carbono de la atmósfera, lo cual no puede compensar el retraso de las reducciones de emisiones en otros sectores.

1.3 Necesidad de reducir las emisiones de CO₂

No se puede obviar que nos encontramos ante una emergencia climática y una crisis energética debido al agotamiento de los combustibles fósiles. Aunque tampoco se puede obviar que el horizonte de vida de dichos combustibles no parece que vaya a superar un período de más de cincuenta años.

Esta situación dramática requiere que se tengan que adoptar medidas urgentemente para eliminar o como mínimo reducir en un gran porcentaje las emisiones de gases efecto invernadero, para ello se pretende sustituir el sistema de energía actual basado en la utilización de los combustibles fósiles, por un sistema energético basado principalmente en la utilización de fuentes de energía renovables.

Desde principios de la época industrial, la humanidad ha emitido grandes cantidades de GEI y otros tipos de gases radiactivos a la atmósfera, todo esto se debe al uso de los combustibles fósiles. La concentración atmosférica de estos gases que contaminan ha aumentado considerablemente, siendo la concentración atmosférica de CO_2 en 2011 próxima a las 390 ppm. Como consecuencia de esta crisis, según el IPCC en 2007 la temperatura había aumentado en 0,8°C en el último siglo y medio y si la humanidad sigue emitiendo tal cantidad de GEI la temperatura media global seguirá aumentando en las próximas décadas y siglos.

La convención Marco de las naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) reconoció en 1992 que había que reducir una cantidad sustancial las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar una interferencia antropogénica potencialmente peligrosa (IAD) en el sistema climático. Para evitar la IAD debe limitarse el aumento de la temperatura global a menos de +2°C con respecto a la época preindustrial, o sucesivamente la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero inferior a unas 450 ppm de CO_2 equivalente.

La crisis económica inducida por la pandemia mundial que ha sufrido el mundo, el COVID-19, ha provocado una gran presión en el sistema energético actual, lo que ha provocado grandes aumentos en los precios del mercado del gas natural, carbón y electricidad. A pesar de los avances que se han llevado a cabo en las energías renovables y la movilidad eléctrica, 2021 sufrió un gran repunte en el uso del carbón y el petróleo, y debido a este suceso se ha producido el segundo mayor aumento anual de emisiones de CO_2 en la historia. Aún estamos muy lejos de alcanzar los hitos de la AIE Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE), en el que trata una hoja de ruta hacia una estabilización de 1,5°C en el aumento de las temperaturas medias globales.

Centrándonos en el Marco europeo es importante destacar que el cambio climático influye en todas las regiones de Europa, teniendo su reflejo tanto en un aumento de las temperaturas y como consecuencia el riesgo de desertización como en un incremento de las precipitaciones anuales y los riesgos por inundaciones.

La Agencia Europea de Medio Ambiente publicó que en 2015 la UE fue el tercer emisor de GEI más grande del mundo, por detrás de China y EEUU. La Unión Europea tiene un papel clave en las conversaciones de la ONU acerca del cambio climático y corrobora el Acuerdo de París. Todos los países de la Unión Europea están comprometidos, pues coordinan sus posiciones y acuerdan objetivos comunes para ayudar a la reducción de emisiones a nivel global.

En el Acuerdo de París, la Unión Europea se comprometió a reducir las emisiones de GEI para 2030 en un 40% por debajo de los niveles de 1990 como mínimo. En 2021, la UE mejoró su objetivo y así poder reducir las emisiones en un 55% como mínimo para 2030, además de la neutralidad climática para 2050.

Con la Ley Europea del Clima, que fue aprobada en 2021 y que es parte del Pacto Verde Europea, la Unión Europea convirtió el acuerdo político de alcanzar las emisiones netas cero para 2050 en una obligación

legal, fijando la reducción de las emisiones en un 55% como mínimo. Además, la UE está trabajando para poder tener en 2050 una economía circular, proteger la biodiversidad y poder crear un sistema alimentario sostenible.

Por su parte, España se ha marcado el objetivo de reducir sus GEI tanto en el ámbito de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el Acuerdo de París y su Protocolo de Kioto con en la Unión Europea. Los objetivos comprometidos por España se pueden resumir en los siguientes periodos.

- Periodo comprendido entre 2008 y 2012, llamado como el primer periodo de compromiso del Protocolo de Kioto, en el cual España se comprometió a poner un límite en el aumento de sus emisiones de gases de efecto invernadero, de forma que las emisiones totales no superasen el 15% del nivel de emisiones del año base (1990/1995).

- Periodo 2013-2020

Las emisiones del conjunto de regiones que conforman la Unión Europea deben reducirse en un 20% respecto el año base. Para conseguir este objetivo, por un lado, se deben reducir para 2020 un 21% respecto los niveles del año 2005 de las emisiones de CO_2 de los sectores más intensivos en el uso de la energía como por ejemplo la generación, siderurgia, fabricación de cemento, papel, vidrio, etc. Por otro lado, España debe reducir un 10% de las emisiones restantes. Este segundo periodo coincide con el segundo periodo de compromiso del Protocolo de Kioto.

- Periodo 2021-2030, periodo coincidente con el Acuerdo de París

Los objetivos para reducir las emisiones de cara a 2030 fueron concretados en las Conclusiones del Consejo Europeo de octubre de 2014, en el que se aprobó el Marco de Políticas de Energía y Cambio Climático 2021-2030. Pero en diciembre de 2020, se celebró el acuerdo del Consejo Europeo donde se introdujeron nuevos objetivos.

1. Reducir un 55% de emisiones con respecto a 1990 como mínimo para 2030
2. Con respecto al consumo de energías, un 32% como mínimo debe provenir de energías renovables en 2030.
3. Para 2030 debe haber al menos un 32,5% de mejora en la eficiencia energética
4. La consecución del objetivo de interconexiones de electricidad del 15% en 2030.

- Horizonte 2050

En marzo de 2020 la Comisión Europea propone la Ley del Clima Europea donde establece el marco para poder alcanzar la neutralidad climática de la Unión Europea en 2050.

1.4 Impacto del sector del transporte en el consume energético mundial

Tanto en España como en la Unión Europea el sector con mayor porcentaje de consumo energético es el transporte, con un 31% de la energía final consumida en los países de la UE, alcanzando en España el 39,7% en 2018. El transporte terrestre con 92% del consumo de energía final es el transporte que más peso tiene. La

tabla 1 nos ilustra la evolución de los consumos de cada medio de transporte durante un período de 6 años.

Modo de transporte	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Ferroviario	15.796	16.128	16.267	15.832	15.527	15.840
Aéreo	32.851	32.637	33.999	36.690	38.470	41.561
Marítimo*	21.181	13.487	17.893	25.281	40.039	41.303
Carretera total	1.059.496	1.074.714	1.111.907	1.145.297	1.170.339	1.196.381
Carretera urbana**	362.987	372.063	378.352	389.664	392.067	403.872
Carretera no urbana	696.509	702.651	733.555	755.633	778.272	792.509
Carretera no urbana - pasajeros	411.683	409.112	424.196	441.600	433.937	442.597
Carretera no urbana - mercancías	284.826	293.539	309.359	314.034	344.335	349.912
Total transporte nacional	1.129.323	1.136.966	1.180.066	1.223.101	1.264.375	1.295.085

Tabla 1 Consumo de energía final nacional por medio de transporte en TJ. Fuente: (MITMA, 2020)

Desde 2008 hasta 2018 el consumo de energía final por parte del sector del transporte se ha reducido en un 8,44% con una interrupción de la tendencia decreciente entre 2013 y 2014. En cambio, a partir de 2018 el consumo se ha ido incrementando por encima del 3% cada año.

Debido a esto el sector del transporte se ve obligado a experimentar una mayor transformación a corto y medio plazo. A continuación, vamos a ver el reflejo de estas medidas en el sector del transporte:

La aviación civil representa el 13,4% de las emisiones totales de CO_2 del transporte de la UE. En junio de 2022, el Parlamento apoyo que se hiciese una revisión del sistema de comercio de derechos de emisión para la aviación, para que se aplique a todos los vuelos que salgan y entren del Espacio Aéreo Europeo. Los euros diputados pretenden convertir gradualmente el hidrógeno o el combustible sintético como los principales combustibles para la aviación. Tienen la intención de que los proveedores comiencen a comercializar combustibles sostenibles a partir de 2025, para poder alcanzar el 85% de todo el combustible de aviación en los aeropuertos de la Unión Europea para 2050.

Con respecto a los coches y furgonetas, producen el 15% de las emisiones de CO_2 de la UE, por lo que el Parlamento aprovecho para apoyar la propuesta de la Comisión de emisiones cero para coches y furgonetas en 2035, fijando unos objetivos intermedios del 55% para los coches y un 50% para las furgonetas en 2030. El Parlamento acordó introducir la tarificación del carbono para el transporte por carretera, que consiste en que las empresas paguen un precio por el carbono en productos como el combustible, en cambio los consumidores

finales están exentos hasta 2029.

1.5 Objetivos

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es justificar el uso del hidrógeno como combustible para propulsar los vehículos como alternativa a los vehículos convencionales movidos por combustibles fósiles y ayudar a la descarbonización del sector del transporte.

La primera parte del trabajo se basa en un estudio de la cadena de valor del hidrógeno, desde su obtención hasta su almacenamiento, analizando por último su uso en la tecnología de la pila de combustible, la cual es la más óptima para propulsar los vehículos con hidrógeno.

Después se explicará el funcionamiento del vehículo de hidrógeno, junto con una breve explicación de los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos que se comercializan en la actualidad. Además, se realiza una investigación del uso del hidrógeno en el sector del transporte, es decir, desde el transporte terrestre hasta el marítimo, ferroviario y aéreo.

Por último, se realiza una comparación de las 3 diferentes tecnologías de coches que hay en el mercado, describiendo las características actuales de cada uno de ellos para poder entender las principales diferencias. Con todo esto se pretende concluir si el hidrógeno tendrá o no un papel relevante en el sector del transporte.

2 EL HIDRÓGENO

2.1 La producción de hidrógeno

Aunque hay varias opciones en el proceso de producción del hidrógeno, la mayoría de ellos tiene un impacto en el medio ambiente. En la figura 2 se representa las fuentes energéticas de las que se obtiene el hidrógeno, siendo el 96% obtenido a partir de combustibles fósiles. Esto se debe a las ventajas económicas que suponen estos métodos.

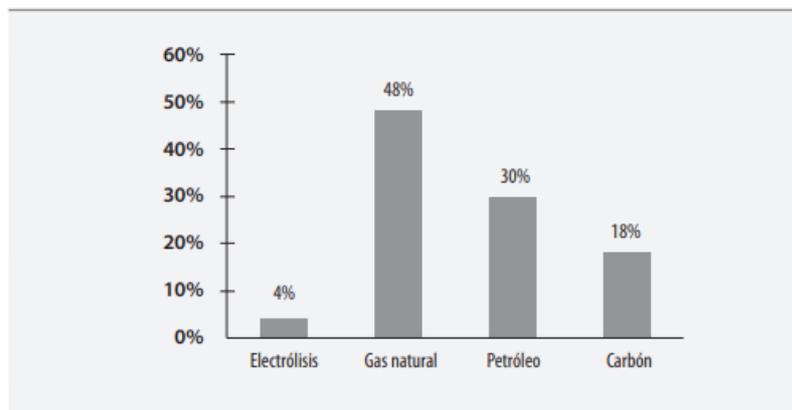


Figura 2: Fuentes de energía para la obtención del hidrógeno

En la figura 3 se muestran los diferentes caminos de producción a partir de la procedencia de la energía utilizada. A continuación, nos vamos a centrar en los más comunes en la actualidad.

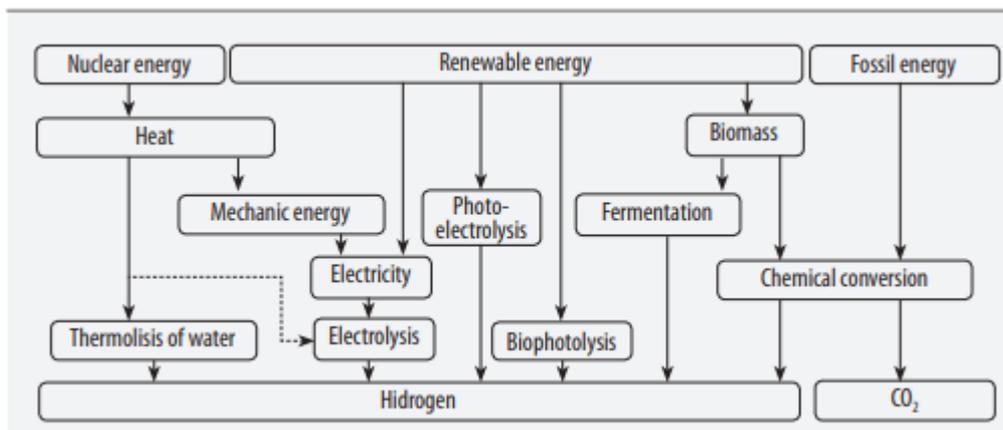


Figura 3: Métodos de producción del hidrógeno. Fuente: (ICAI)

2.1.1 Procesos a partir de gas natural

La principal fuente de obtención es el gas natural, formado principalmente por metano. Las grandes reservas mundiales, su bajo coste y su composición química hacen que el gas natural sea la fuente de hidrógeno más interesante en la actualidad. El proceso de extracción del hidrógeno a partir de gas natural es conocido como

reformado, proceso en el cual se producen óxidos de carbono como subproducto en forma gaseosa, produciendo 11 toneladas de CO_2 por cada tonelada de H_2 . Como alternativa a este proceso, hay una tecnología en fase de desarrollo que se conoce como pirólisis de metano, en la que se produce como residuo 3 toneladas de carbono por tonelada de H_2 .

A este hidrógeno obtenido a partir de gas natural como se explica en la introducción se le conoce como hidrogeno gris. El precio del gas se ha disparado considerablemente desde el verano de 2021, afectando al coste de la producción de hidrógeno, pues con el precio del gas de 2019 costaba 1,5 euros producir un kilo de hidrógeno, mientras que con los precios actuales puede llegar a costar 4,10 euros el kilo de hidrógeno.

2.1.1.1 Procesos de reformado

El reformado es el proceso más común para la producción de hidrógeno en la actualidad, representa el 50% de todos los procesos. El principio de funcionamiento se basa en la descomposición de la molécula de metano (CH_4) en hidrógeno y óxidos de carbono (CO y CO_2). Para ello, se necesitan tres condiciones: altas temperaturas (700 °C - 1100 °C), un catalizador (normalmente níquel) y un agente oxidante (agua y/o aire), siendo el más empleado el agua. El proceso de reformado consta básicamente de 4 procesos como se puede ver en la figura 4, los cuales se explican a continuación:

- **Desulfuración:** Proceso para eliminar las impurezas del gas natural. Se elimina más de un 99% del azufre que contiene el gas.
- **Reformado:** El gas natural una vez libre de impurezas se mezcla con vapor de agua incrementando su temperatura hasta unos 900 °C aproximadamente, se introduce en un lecho catalítico de níquel. De esta forma se obtiene el gas de síntesis (CO y H_2).
- **Desplazamiento:** Se pasa el gas de síntesis a la unidad de desplazamiento, donde se convierte el monóxido de carbono (CO) en dióxido de carbono (CO_2) y se incrementa el hidrógeno (H_2) final.
- **Purificación:** En el purificador se separa el hidrógeno del gas de síntesis, que en su mayoría es CO_2 aunque también contiene CH_4 y CO .

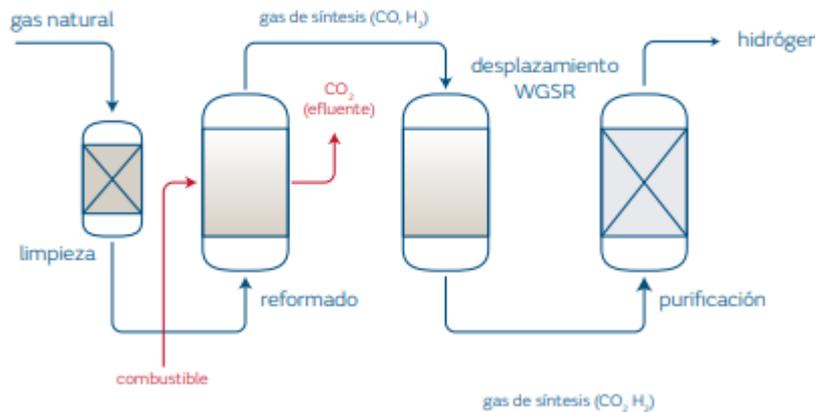
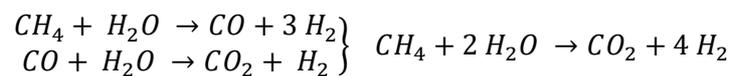


Figura 4: Proceso de reformado para la fabricación de hidrógeno. Fuente: (Fundación Naturgy)

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Se observa que por cada mol de CO_2 se genera 4 moles de H_2 . En cambio, al ser el peso molecular del hidrógeno muy bajo, en cantidades másicas se genera más dióxido de carbono que hidrógeno en cada reacción. Por lo que se genera más cantidad de producto indeseado, porque el dióxido de carbono contribuye a los gases de efecto invernadero. También se deben tener en cuenta las emisiones que se producen al quemar el combustible para obtener las temperaturas necesarias por el proceso. En resumen, se estima que por cada tonelada de hidrógeno producida se emiten entre nueve y once toneladas de CO_2 . Varias plantas de reformado capturan el dióxido de carbono producido. Este hidrógeno se clasifica como gris o azul.

2.1.1.2 Pirólisis

El pirólisis del gas metano consiste en la descomposición del CH_4 en hidrógeno y carbón, sin el uso de ningún agente oxidante (agua y/o aire), por lo que no se generan compuestos químicos como el CO y CO_2 . El único residuo del proceso es el carbón en forma sólida (coque). El proceso es endotérmico ($\Delta H = +74.85$ kJ/mol) y tiene lugar a temperaturas muy altas de 800-1.200°C. La reacción produce 2 moles de hidrógeno por cada molécula de carbón sólido:



Se está desarrollando obtener la energía necesaria para la reacción mediante corriente eléctrica en lugar de térmica, de forma que el proceso se considere renovable.

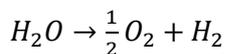
2.1.2 Procesos a partir de agua

2.1.2.1 Electrólisis

La electrólisis consiste en un proceso en el cual la energía eléctrica constituye la fuente principal para realizar las reacciones químicas del proceso y producir la rotura molecular. La electrólisis del agua, se emplea una diferencia de potencial eléctrico y una corriente continua de agua para la disociación de las moléculas de agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), en estado gaseoso.

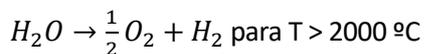
Un electrolizador es un equipo electroquímico que convierte la energía eléctrica en energía química. En algunos casos se combina también con energía térmica al no trabajar a temperatura ambiente. De forma, que cuando se produce excedente de energía eléctrica renovable, se puede almacenar en forma de hidrógeno, denominándose hidrógeno verde.

La reacción que se produce en este proceso es la siguiente:



2.1.2.2 Termólisis

La termólisis se basa en la extracción de hidrógeno de la molécula de agua o hidrocarburo, utilizando fuentes de calor a temperaturas superiores a los 2.000 °C. Cuando la fuente de calor provenga de la combustión se considera un proceso químico, en cambio sí proviene de una fuente externa como la energía solar o nuclear se considera termolítico.



Para alcanzar estas elevadas temperaturas sin desequilibrar los balances energéticos, los procesos de termólisis se realizan en hornos solares en infraestructuras muy costosas, reduciendo su rendimiento.

2.1.3 Otros procesos de obtención de hidrógeno

Cabe destacar el proceso de gasificación, tanto de fuentes fósiles como por ejemplo el carbón, como de fuentes renovables como la biomasa.

2.1.3.1 Gasificación

Es un proceso que convierte la materia orgánica en gas de síntesis (H_2 , CO y CO_2), a diferencia de la pirólisis se utiliza una pequeña cantidad de agente oxidante (oxígeno, agua o aire), y se obtiene del proceso gas (CO, CO_2 , H_2 y CH_4) y residuo sólido (coque). El proceso tiene lugar a altas temperaturas entre 1.200 -1.400 °C. Estas altas temperaturas se consiguen por la exotermicidad de la reacción y no es necesario el uso de un combustible externo a diferencia del reformado. La presión que se emplea en el proceso depende de la tecnología, aunque el rendimiento se incrementa con el aumento de presión.

2.2 Almacenamiento

Existen varios sistemas de almacenamiento de hidrógeno, pero presenta un gran reto debido a su baja densidad por unidad de volumen. Para incrementar la densidad volumétrica se emplean diferentes métodos, como la compresión, la licuefacción o la incorporación del hidrógeno en la superficie o interior de otros compuestos químicos.

El hidrógeno como gas comprimido se utiliza en el almacenamiento de los vehículos, donde las estaciones de servicio disponen de tanques a alta presión, pero la energía que se utiliza es significativamente alta. El hidrógeno líquido aumenta la densidad de energía almacenada y permite que se transporte a gran escala a través de barcos o camiones cisterna. El consumo energético en el almacenamiento líquido es superior al de compresión.

2.2.1 Tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.

El hidrógeno gaseoso se almacena en recipientes de hidrógeno comprimido a una presión de 350 y 700 bar. Se almacena a temperatura ambiente aproximadamente. Los tanques se clasifican en función de los materiales que se utilizan para fabricarlos y la máxima presión admitida, como podemos ver en la Tabla 2.

Tipo de tanque		Presión admitida (bar)	Características
	Tipo I Acero o Aluminio (sin costuras ni revestimiento)	150 - 300	Muy pesados y de paredes gruesas. Utilizados principalmente en vehículos de GNC y en aplicaciones estacionarias industriales.
	Tipo II Metálicos sin costuras envueltos en aros de fibra de vidrio y resina	450 - 800	Muy pesados. Se utilizan principalmente como <i>buffer</i> o tanque intermedio en aplicaciones estacionarias.
	Tipo III Revestimiento de aluminio sin costuras y envueltos con fibra de vidrio y resinas compuestas.	350 - 700	Más ligeros y de paredes más finas respecto a los de Tipo I y II. Se utilizan principalmente para aplicaciones de movilidad y transporte de H ₂ en trailers.
	Tipo IV Revestimiento no-metálico envueltos con fibra y revestimiento polimérico.	350 - 700	

Tabla 2: Clasificación de los tanques para el almacenamiento del hidrógeno. Fuente: (Fundación Naturgy)

2.2.2 Tanques de hidrógeno líquido

El almacenamiento de hidrógeno líquido constituye la base de la red de infraestructura industrial existente y de distribución. Se necesitan bajas temperaturas para su almacenamiento (-253 °C), por lo que su aplicación a bordo de vehículos está en fase de desarrollo. Un tanque de hidrógeno líquido está diseñado para retener un líquido criogénico y no soportar presiones internas. Debido a esto el tanque debe estar completamente aislado para que la transferencia de calor que se produzca sea mínima. Pero el aislamiento nunca es perfecto por lo que un tanque de hidrógeno estacionario y que no ha sido utilizado en un largo periodo de tiempo

terminará agotándose. El hidrógeno criogénico es el sistema más eficiente por su densidad energética por volumen. Por este motivo el hidrógeno líquido a bajas presiones se utiliza para el transporte y almacenamiento de hidrógeno en grandes cantidades.

2.2.3 Materiales químicos

El almacenamiento en materiales químicos se trata de la unión covalente en forma sólida o líquida con compuestos con una gran densidad de hidrógeno. De esta forma la naturaleza almacena y utiliza hidrógeno, por procesos biológicos catalizados por enzimas donde el hidrógeno se libera y une, esto se conoce como deshidrogenación e hidrogenación. La deshidrogenación se puede realizar hidrolíticamente por reacción con el agua o termolíticamente, es decir aportando calor al compuesto químico.

Los metales y aleaciones como son el magnesio, titanio, hierro, manganeso, níquel o cromo forman hidruros metálicos con la existencia del hidrógeno. Los átomos de hidrógeno se empaquetan dentro de una estructura metálica, de esta forma se obtienen mayores densidades de almacenamiento volumétricas respecto al hidrógeno comprimido y líquido. Para formar hidruros metálicos es necesario la presencia de calor para poder absorber el hidrógeno, el cual se distribuye de manera compacta en toda la red de hidruros. La reacción es reversible y es determinada por la presión del hidrógeno.

2.3 Usos del hidrógeno: La pila de combustible

Con relación al uso que se le puede dar al hidrogeno, las pilas de combustible constituyen una de las de más alta eficiencia, lo que permite una amplia implementación del uso del hidrogeno en muchos sectores, como el transporte, o en sistemas de cogeneración de electricidad y calor para industrias o edificios.

El hidrogeno también puede ser utilizado en turbinas convencionales (hasta un 60%) o en turbinas específicas (hasta el 100%). El uso del hidrogeno en diferentes tipos de pilas de combustible, y en algunos casos en quemadores, permite alcanzar un alto nivel de descarbonización en los procesos industriales.



Figura 5: Esquema de la generación, distribución y uso final del hidrógeno. Fuente: (Fundación Naturgy)

En el presente trabajo vamos a centrarnos en las pilas de combustibles y sus aplicaciones.

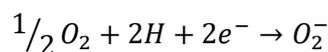
Una pila de combustible (FC) es un dispositivo que permite generar electricidad a partir de la energía química del hidrógeno y el oxígeno sin que exista combustión.

La pila de hidrogeno está formada por dos electrodos; el ánodo donde se subministra el hidrógeno y el cátodo donde se subministra el oxígeno. Entre los dos electrodos de la celda, ánodo y cátodo, se encuentra el electrolito, un aislante electrónico cuya función es separar los dos reactivos y permitir el transporte de iones. Por último, hablamos del catalizador; un material que se encarga de facilitar la reacción de hidrógeno y oxígeno la cual es necesaria para generar la electricidad.

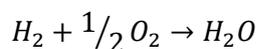
Cuando el hidrógeno (H_2) que entra en la pila entra en contacto con el catalizador, se separa en dos iones (H^+) y dos electrones. Los electrones pasan a través del ánodo hasta el circuito externo generando corriente eléctrica y vuelven a la pila por la parte del cátodo.

En el cátodo el oxígeno (O_2) pasa a través del catalizador y forma dos átomos de oxígeno cargados negativamente que atrae a los iones de hidrógeno (H^+). Todo esto forma una molécula de agua (H_2O)

La reacción que se produce en el ánodo es de oxidación mientras que en el cátodo ocurre la de reducción:



Al combinar las dos reacciones obtenemos la reacción de combustión directa del hidrógeno y oxígeno:



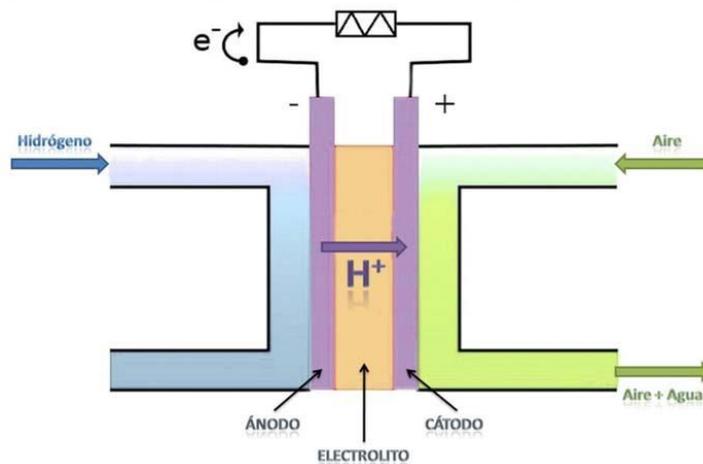


Figura 6: Funcionamiento de una pila de combustible. Fuente (Movilidad Eléctrica obtenido electricvehiclesresearch)

Al igual que en las baterías, para obtener mayor voltaje y potencia las celdas se organizan en los llamados stacks. Para ello es necesario el uso de placas bipolares o interconectores cuya función es conectar eléctricamente en serie las celdas y separar los flujos de gases que se dirigen a las cámaras catódica y anódica.

Las principales ventajas de las pilas de combustibles son:

- Ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos ya que al utilizar el hidrógeno como combustible solo emite agua.
- La pila de hidrógeno transforma la energía química en eléctrica de forma directa, por lo que es más eficiente que los motores de combustión dado que estos deben de transformar la energía química en calor, y este en energía mecánica provocando el llamado “cuello de botella térmico”
- La elevada eficiencia de los procesos electroquímicos en los que se basa en comparación con los procesos de combustión.
- Son versátiles y seguras, pues las celdas pueden adaptarse para producir energía tanto en forma de calor como de electricidad.

2.3.1 Tipos de pila de combustible

Las pilas de combustible, por norma general se clasifican según el electrolito que utilizan. El tipo de electrolito determina el combustible requerido, el rango de temperaturas de operación de la celda, el tipo de reacciones químicas que tienen lugar y el tipo de catalizadores que requieren para que tenga lugar la reacción.

Hay varios tipos de pilas de combustible con sus propias características y ventajas. A continuación, vamos a exponer las más comunes:

- **Las pilas de combustible de membrana polimérica (PEM)**

Estas pilas son las más utilizadas y las más viables para el transporte, utilizan una membrana polimérica como electrolito, el cual es un excelente conductor de protones. Al estar en estado sólido tiene

características de baja corrosión lo que da lugar a un bajo mantenimiento y una larga vida útil.

Como ventaja estas pilas son capaces de entregar para una misma tensión mucha más corriente y, por tanto, más potencia que cualquier otro tipo de pila de combustible.

Proporcionan altas densidades de corriente, mayores que las de otro tipo de pilas (exceptuando algunas pilas alcalinas). La temperatura típica ronda los 70 °C, el cual es un valor bastante bajo por lo que pueden ser arrancadas rápidamente. Además, debido a la baja temperatura de operación no requiere aislamientos térmicos importantes.

Como desventaja el calor que evacúan estas pilas en el circuito de refrigeración solo se puede aprovechar para calentar agua sanitaria o aplicaciones similares, ya que es de baja calidad. Por tanto, su eficiencia energética es menor que la de las pilas como las MCFC O SOFC.

- **Las pilas de combustible alcalinas (AFC)**

Estas pilas están basadas en un electrolito líquido alcalino (hidróxido potásico, KOH). La concentración de KOH varía en función de la temperatura de trabajo; a 50-80°C se utiliza una disolución del 30-40% en peso, mientras que a 200°C la disolución es del 85% en peso.

La velocidad de reducción del oxígeno en medio alcalino es rápida por lo que no es necesario utilizar metales nobles en el cátodo y puede usarse elementos como el níquel, aunque en el ánodo es imprescindible utilizar platino. Esto hace que estas pilas sean las más baratas de fabricar.

La eficiencia de este tipo de pilas es la más alta con respecto al resto de pilas, llegando a valores de hasta el 70%.

Como principal desventaja, es que reacciona con el dióxido de carbono lo que disminuye considerablemente la vida útil de la pila. Para que la pila realice un correcto funcionamiento, el oxígeno utilizado debe de ser aislado previamente y esto supone un alto coste.

- **Las pilas de ácido fosfórico (PAFC)**

Este tipo de pilas utiliza ácido fosfórico concentrado como electrolito, retenido en una matriz de carburo de silicio. Tiene una temperatura de operación que ronda entre los 150 y 250°C. Los electrodos son de platino con una alta sensibilidad al envenenamiento por monóxido de carbono.

Las pilas PAFC operan en medio ácido, esto implica que la cinética de la reacción de reducción del oxígeno es más lenta que las pilas que operan en medio básico. El medio ácido favorece la corrosión de los electrodos y la agregación de las partículas de platino, esto supone una pérdida de la superficie útil del catalizador, por lo que es importante la preparación de los catalizadores.

A parte de las pilas alcalinas, estas son las que tienen un mayor nivel de desarrollo tecnológico, con

una amplia utilización en aplicaciones estacionarias en fase de demostración. En la actualidad, estas pilas se comercializan de gran potencia (200 kW) con una vida útil superior a las cuarenta mil horas y una eficiencia eléctrica del 40%.

Las pilas PAFC han sido las primeras en ser fabricadas y distribuidas a gran escala.

- **Las pilas de carbonatos fundidos (MCFC)**

Utilizan como electrolito una sal fundida de carbonatos alcalinos (Li, Na, K) retenidos en una matriz de aluminio de litio. Trabajan a temperaturas elevadas, superiores a 650 °C. Además, mejoran sus prestaciones cuando trabajan a presión.

Normalmente se utilizan materiales como el níquel o el aluminio para el ánodo, y óxido de níquel dopado con litio para el cátodo. No obstante, uno de los inconvenientes de las pilas MCFC es la corrosión y disolución gradual del cátodo en el electrolito.

Admiten altas concentraciones de dióxido y monóxido de carbono por lo que son perfectas para la utilización de todo tipo de combustibles como pueden ser el biogás o el gas natural.

Al ser pilas que trabajan con temperaturas elevadas, hacen que sea posible la cogeneración de electricidad mediante turbinas con los gases calientes que abandonan la pila, con lo que el rendimiento global aumenta de un 60% a un 85%, aproximadamente, en aplicaciones de 50 kW a 5 MW.

Al estar el electrolito en estado líquido, estas pilas se utilizan en aplicaciones estacionarias.

- **Las basadas en óxidos sólidos cerámicos (SOFC)**

El electrolito utilizado es un óxido metálico no poroso que sea buen conductor iónico, normalmente óxido de zirconio estabilizado con óxido de ytrio. Para el cátodo se usan óxidos mixtos de manganeso, estroncio y lantano, o manganeso, estroncio, cobalto y hierro, los cuales presentan buena conductividad térmica. Para el ánodo se utiliza un material que está compuesto por un metal y un material cerámico constituido por níquel metálico y en mismo material del electrolito.

Estas pilas trabajan a temperaturas muy elevadas, entre los 900-1000 °C. Esto implica un aporte continuo de energía lo que supone una disminución de la eficiencia energética de la pila. Sin embargo, los gases a la salida de la pila también están a una temperatura muy elevada y pueden utilizarse para mover una turbina externa. Da lugar a un sistema híbrido que permite alcanzar valores de eficiencia energética de hasta el 90%. Las pilas SOFC nos proporcionan los rendimientos más elevados que se han conseguido jamás en la generación de electricidad.

La tabla 3 nos proporciona un resumen de las características de los tipos de pilas de combustible de hidrógeno descritas anteriormente.

Tipos de pilas de combustible					
	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Combustible utilizado	Hidrógeno o metano	Hidrógeno	Hidrógeno	Metano	Hidrógeno o metano
Rango de potencia (kW)	1-100	1-100	5-400	300-3.000	1-2.000
Eficiencia (%) H_2/CH_4	60/40	60/-	40/-	-/50	70/60
Temperaturas de operación (°C)	40-80	65-220	150-210	600-700	600-900
Aplicación	Transporte Electricidad Cogeneración Generación distribuida	Electricidad Aplicaciones espaciales	Electricidad Cogeneración	Generación estacionaria a gran escala	Electricidad Cogeneración Generación distribuida

Tabla 3: Características principales de cada una de las tecnologías de pila de combustible. Fuente: (Fundación Naturgy)

2.3.2 Aplicaciones

Las pilas de combustible de hidrógeno tienen una amplia variedad de aplicaciones:

- **Portátiles:**

Aplicaciones utilizadas para pequeños dispositivos electrónico como son los ordenadores, los teléfonos móviles o los pequeños electrodomésticos. Se espera que este tipo de aplicación sea la que más relevancia tenga en los mercados.

Como ventaja este sistema ofrece elevadas densidades de potencia y un peso reducido, lo cual nos proporciona una mayor autonomía frente a los actuales sistemas basados en baterías.

En relación con el sistema de suministro de combustible, podría basarse en pequeños cartuchos de hidrógeno o con metanol líquido.

- **Estacionarias:**

Las pilas de combustible para generación de energía eléctrica pueden funcionar conectadas a la red como aplicaciones distribuidas en hospitales, empresas, zonas residenciales, o como sistemas auxiliares en casos de emergencia cuando falle el suministro principal. También son utilizadas de forma aislada, en zonas donde no es posible conectarse a la red de distribución. El calor que se produce durante su operación es utilizado para disponer de agua caliente o calefacción.

El tipo de pila de combustible utilizada en las aplicaciones estacionarias dependen del tamaño de la aplicación. Podemos distinguir entre las estacionarias de grandes dimensiones, en la cual la tecnología PAFC ocupa en la actualidad una buena posición, y las estacionarias de reducidas dimensiones en las que destacan las tecnologías PEMFC y SOFC para el diseño de micro-redes eléctricas aisladas.

- **Sector del transporte**

Debido al agotamiento de las reservas de petróleo y al cambio climático es necesario establecer medidas sobre el sector del transporte ya que tiene un peso relevante en el consumo de combustibles fósiles y en las emisiones de GEI. Una de las soluciones para este problema reside en el hidrógeno como combustible en el sector del transporte ya que no contamina en su utilización.

Una de las opciones para implementar el hidrógeno es a través de los motores de combustión interna (ICE) en los que el hidrógeno se quema dentro del motor de manera similar a la gasolina. Destaca su facilidad de implantación debido a la gran capacidad de adaptación que tienen estos motores. Sin embargo, presentan un bajo rendimiento propio de los ICE, además de que conlleva un cierto nivel de emisiones por la combustión.

La mejor opción se basa en las pilas de combustible de hidrógeno explicadas anteriormente, como sustitución de los combustibles fósiles para vehículos eléctricos (coches, autobuses, barcos, aviones).

3 VEHÍCULOS MOVIDOS POR HIDRÓGENO

Debido a la situación actual que estamos viviendo con el agotamiento de los combustibles fósiles, el desorbitado aumento de precios de dichos combustibles y el cambio climático, se postulan en el sector del transporte el vehículo movido por hidrógeno y el vehículo eléctrico como las mejores alternativas para la sustitución de los vehículos de motores de combustión interna.

A continuación, vamos a explicar el funcionamiento de los FCEV y su situación actual, para después introducir los vehículos eléctricos y los de combustión interna para poder realizar una comparación entre ambas opciones.

3.1 Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV)

Los vehículos de pila de combustible (FCEV, por sus siglas en inglés) cuyo funcionamiento se basa en el uso de una celda electroquímica que produce energía a partir del hidrógeno y del oxígeno, dicha energía es la utilizada para alimentar el motor eléctrico. Además, en este tipo de vehículos el hidrógeno se utiliza para producir energía a demanda.

Estos vehículos no utilizan unas baterías para almacenar la energía, si no que la propia pila de combustible funciona como una central eléctrica eficiente.

En la pila de combustible se produce el proceso conocido como electrólisis inversa, en el que el hidrógeno reacciona con el oxígeno. El hidrogeno resulta de uno o varios depósitos del vehículo, en cambio el oxígeno se obtiene del aire ambiental. De esta mezcla se obtiene la energía eléctrica generada, calor y agua, que será expulsada de forma gaseosa por el tubo de escape. Debido a que lo que se expulsa es agua, este tipo de vehículos no genera emisiones nocivas a nivel local.

La electricidad que se genera en la pila de combustible tiene dos posibles trayectos, uno de ellos consiste en fluir hacia el motor y accionar el vehículo, o por otro lado puede cargar una pequeña batería que funciona como almacén de la energía hasta que sea necesaria para accionar el motor.

Esta batería es mucho más pequeña que la de los coches eléctricos ya que está constantemente recargando desde la pila de combustible.

En estos vehículos también existe la posibilidad de “recuperar” la energía de frenado, que consiste en que el motor eléctrico transforme la energía cinética del vehículo en energía eléctrica para poder almacenarla en la batería.

Estos vehículos se pueden considerar eléctricos ya que el funcionamiento del motor es el mismo con la única diferencia de que la energía procede de la pila de combustible.

Los FCEV estas formados fundamentalmente por:

- Un motor eléctrico, el cual se distinguen de dos tipos, corriente continua o síncronos, e inductivo o asíncrono. El principio de funcionamiento del motor síncrono se basa en la alineación del imán con el campo magnético. Mientras que en el estator circula corriente alterna para generar un campo magnético. Al girar, el imán (producido por corriente continua) se encuentra en movimiento(rotor), tiende a alinearse con el campo magnético producido por el estator, girando así el eje que lo sostiene, produciendo movimiento que se traslada a las ruedas.
En cambio, en un motor asíncrono no hay imanes ni electroimanes en la parte móvil, si no un elemento sobre el cual, por el fenómeno de inducción de Faraday, se inducen corrientes opuestas a la variación del campo magnético producido por el estator. La interacción de los campos magnéticos del estator y del rotor es lo que da el par que genera el movimiento.
- Convertidor de voltaje de la pila de combustible cuya función es obtener más tensión a la salida que a la entrada.
- Grupo de pila de combustible de donde se obtiene la energía eléctrica.
- Batería donde se almacena la energía generada por la pila de combustible y la energía “recuperada” de frenado.
- Unidad de control de la energía que se encarga de optimizar la entrega de potencia de la pila para las diversas situaciones que se pueden dar, además de controlar la carga y descarga de la batería.

En la siguiente figura podemos observar los elementos fundamentales que forman un vehículo de estas características.

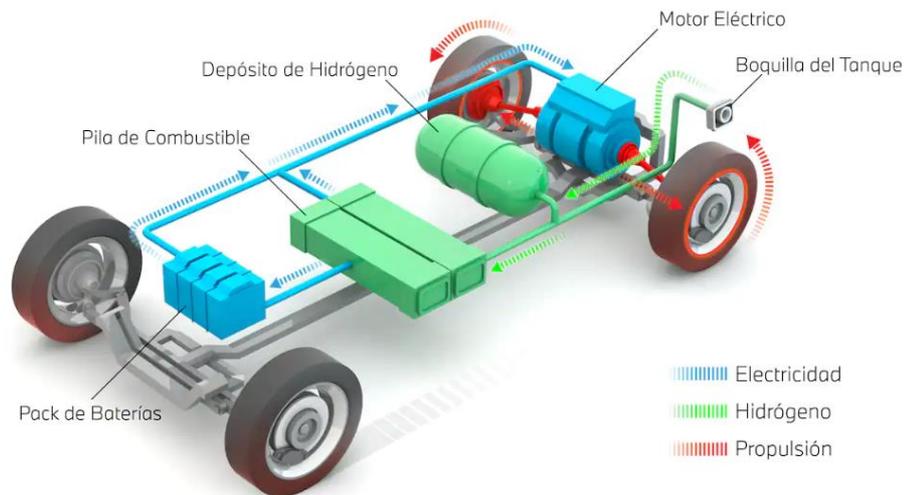


Figura 7: Funcionamiento de un vehículo propulsado por hidrógeno. Fuente: (BMW).

3.1.1 Estaciones de repostaje de hidrógeno

La distribución del hidrógeno para usarlo como combustible en el sector del transporte se desarrolla mediante una red de estaciones de repostaje. Al igual que las gasolineras, electrolineras o ferrolineras, se conoce como hidrolineras o hidrogeneras a las estaciones de servicio (EE. SS) que se encargan de almacenar y proporcionar el hidrógeno para los vehículos.

Existen diferentes técnicas de producción y logística para la construcción de una estación de servicio. Como primera de las opciones se obtiene el hidrógeno mediante la producción centralizada en grandes plantas (off site), comúnmente conocida como hidrolinera, en la cual el transporte de H₂ se realiza por red o por carreteras ya sea de forma líquida o como gas comprimido. La segunda técnica consiste en la producción de H₂ de manera descentralizada o distribuida (on site), conocida como hidrogenera, la cual se caracteriza por el aprovechamiento de las actuales infraestructuras (red eléctrica, red de gas natural y oleoductos), además en esta técnica se instalan en las EE.SS electrolizadores o equipos de reformado a través de dichas redes para la producción del hidrógeno en el punto de suministro. La última y tercera técnica se basa en la producción del H₂ a bordo de los vehículos (on board), aunque dicha técnica es la menos desarrollada.

La presión con la que se suministra hidrógeno a los vehículos es un punto a tener en cuenta, pues a los vehículos pesados, como son los camiones, autobuses, etc deben proporcionar el hidrógeno a 350 bar, mientras que las estaciones destinadas a vehículos ligeros deben proporcionar el hidrógeno a 700 bar. Debido a esta situación el proceso de compresión y almacenamiento del hidrógeno es un proceso importante a la hora de la construcción de la hidrogenera.

Además de lo comentado, como vemos en la siguiente figura, la mayoría de las estaciones de repostaje de hidrógeno deben estar compuestas por los siguientes elementos.

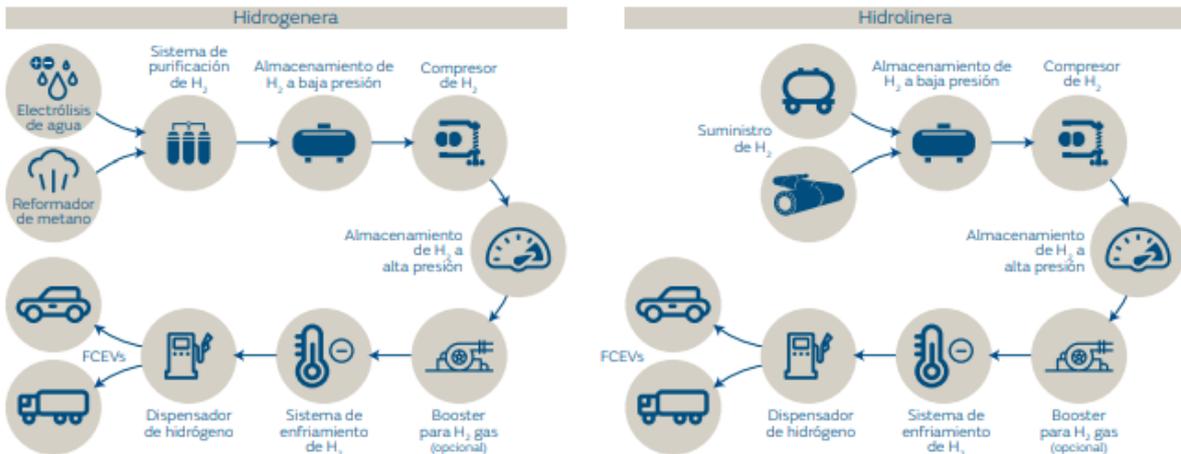


Figura 8: Esquema de funcionamiento de las hidrogeneras e hidrolineras. Fuente: (Fundación Naturgy)

- Unidad de producción de hidrógeno (electrolizador/ equipo de reformado)
- Unidad de purificación (>99,97%)
- Compresor de hidrógeno para el sistema de almacenamiento
- Depósitos de almacenamiento de hidrógeno (gas o líquido)
- Sistema de mantenimiento y regulación de la presión de entrega a 700 o 350 bar.
- Sistema de refrigeración del hidrógeno (>-40 °C)
- Sistema de válvula, panel de control, tuberías, sistema de seguridad, etc
- Dispensador para abastecer a los vehículos a la presión requerida desde los tanques presurizados de almacenamiento.

La principal dificultad que presenta el hidrógeno en el sector del transporte es la escasez de EE.SS que existen en la actualidad. En España actualmente solo hay 6 hidrogeneras que se encuentran ubicadas en Madrid, Sevilla, Puertollano, Huesca, Albacete y Zaragoza, que además no son de uso público. En la Hoja de Ruta del Hidrógeno, España se ha marcado el objetivo de la construcción de 100-150 hidrogeneras de uso público para 2030. Deben ser situadas en lugares accesibles al consumidor, repartidas por el territorio nacional con una distancia máxima de 250 km entre ellas. Además, el plan pretende que el parque automovilístico español tenga para 2030 entre 5000 y 7000 vehículos de pila de combustible.

A finales de 2021, había un total de 685 hidrogeneras en funcionamiento en todo el mundo. De todas ellas, 228 están ubicadas en Europa, liderada por Alemania que cuenta con 101 de ellas, seguida por Francia con un total de 41 estaciones de repostaje. Le sigue Reino Unido con 19, Suiza con 12 y los Países Bajos con 11 estaciones. Asia contaba con 363 estaciones de hidrógeno, liderado por Japón con 159 por delante de Corea que contaba con 95. De las 86 hidrogeneras ubicadas en Norteamérica California es el estado con mayor

número de estaciones de hidrógeno, exactamente 60 de ellas.



Figura 9: Mapa de la hidrogeneras existentes en el mundo. Fuente: (H2Stations)

Los costes que conlleva la instalación de una estación de repostaje rondan entre el millón y los ocho millones de euros, lo que supone un gran problema, ya que al no haber los suficientes vehículos con hidrógeno circulando en la actualidad, supone una gran inversión difícil de amortizar.

3.2 Vehículos eléctricos (EV)

Los vehículos eléctricos se convirtieron en la principal técnica para sustituir los vehículos de combustión interna y ayudar a la descarbonización del sector del transporte.

Su funcionamiento se caracteriza por su sistema de propulsión compuesto por uno o más motores eléctricos alimentados por energía almacenada en baterías recargables. Las baterías se recargan bien enchufando el vehículo a una toma de corriente eléctrica o con el sistema de frenado regenerativo.

Por lo general se componen básicamente del motor eléctrico, encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para mover el vehículo, las baterías que almacenan la energía en forma de corriente continua y los transformadores cuya función es transformar la corriente alterna proveniente de la red eléctrica en corriente continua para poder almacenarla en las baterías.

En el momento actual, las baterías son el punto crítico de los vehículos eléctricos. De ellas depende la

autonomía, las prestaciones y el precio final del vehículo. Existen muchos tipos de baterías, aunque las de ion litio se han colocado en primer lugar debido a sus características: no presentan memoria, son muy duraderas y pueden soportar muchos ciclos de carga. Existen varias alternativas de vehículos eléctricos, los cuales se explican a continuación:

3.2.1 Vehículo eléctrico de batería (BEV)

Este tipo de vehículos se consideran puramente eléctricos, son propulsados únicamente por el motor o motores eléctricos que utilizan la energía eléctrica almacenada en el sistema de baterías interno. Su principal característica es que para su funcionamiento debe conectarse a la red eléctrica para poder recargar las baterías y tener autonomía suficiente.

En comparación con los vehículos de combustión interna, son unos vehículos mucho más sencillos, pues contienen aproximadamente un 90% menos de piezas que los ICE. Esto hace que el mantenimiento y las reparaciones por posibles fallos técnicos sean mucho más sencillas. Alcanza eficiencias de hasta el 95% y además no emiten apenas ruido lo que ayuda a la contaminación acústica de las ciudades. Su principal inconveniente son las baterías, estas proporcionan una baja autonomía lo que hace que este tipo de vehículos sea utilizado para distancias cortas, además necesitan un alto tiempo de recarga y su precio actualmente es muy elevado.

3.2.2 Vehículo híbrido eléctrico (HEV)

Como característica principal, estos vehículos poseen dos motores, uno de combustión interna y otro eléctrico, lo que reduce el consumo de combustible y las emisiones. Estos dos motores son capaces de funcionar conjuntamente o únicamente como eléctrico debido a las baterías. Si las baterías tienen suficiente energía almacenada funcionan únicamente con el motor eléctrico. Las baterías comienzan a descargarse hasta que llegan a un mínimo que es cuando comienza a funcionar el motor de combustión, hasta que las baterías vuelvan a tener energía suficiente. La función de los dos motores es reducir las emisiones de CO_2 . Estos vehículos son muy complejos lo que hace que su precio de mercado aumente considerablemente.

Las baterías utilizadas poseen menos capacidad que las del BEV, pues la energía que almacenan proviene del motor de combustión y de frenadas, no de la red eléctrica como ocurre en los vehículos puramente eléctricos por lo que no necesitan puntos de recarga. Poseen las mismas ventajas que los BEV, pero además al tener el motor de combustión la autonomía es mayor lo que les permite recorrer mayores distancias.

3.2.3 Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV)

Al igual que los vehículos híbridos eléctricos, estos poseen dos motores, uno de combustión y otro eléctrico. Cuentan con un depósito de combustible, por lo general gasolina, y un sistema de baterías que a diferencia de los HEV se recargan enchufándolos a la red.

Las baterías de estos vehículos tienen mayor capacidad, por lo que permite que el tiempo de uso del motor eléctrico sea mayor. Por tanto, se ayuda a reducir la contaminación en mayor medida que los HEV. La DGT los considera vehículos cero emisiones otorgándoles la etiqueta medioambiental 0.

Cuando se arranca el vehículo, la batería proporciona la energía, y cuando esta descargada o la energía almacenada no es suficiente se utiliza el motor de combustión. Como ventaja estos vehículos proporcionan la conducción suave y silenciosa que caracteriza a un eléctrico por ciudad o distancias cortas y el respaldo del motor de combustión para distancias largas.

3.2.4 Vehículo eléctrico de autonomía extendida (E-REV)

Estos vehículos se pueden considerar vehículos eléctricos puros, con la excepción de que contienen una ayuda del motor de combustión. La gran diferencia con los híbridos es que, en los E-REV el motor de combustión no es capaz de mover por sí solo el coche. Su función consiste en alimentar la batería cuando esta descargada o con poca energía almacenada. Estos vehículos se recargan enchufándose a la red como los eléctricos.

La capacidad del depósito de combustible suele ser pequeña ya que el gasto de combustible para alimentar al motor de combustión también lo es. A pesar del gasto de combustible y de las pequeñas emisiones de CO₂ que ello conlleva estos vehículos presentan la etiqueta cero de la DGT. Esta tecnología presenta un alto grado de rendimiento y eficiencia.

3.3 Vehículo de combustión interna (ICE)

Los vehículos de combustión interna son aquellos que tienen un motor térmico donde la energía mecánica necesaria para mover el vehículo se obtiene aprovechando la energía liberada en quema un combustible, pues dicha energía se transforma en trabajo, es decir, en movimiento. Los gases que produce el motor se expulsan a través del tubo de escape. Uno de los grandes inconvenientes la baja eficiencia que tienen, pues únicamente aprovechan el 30% de la energía producida, además de las altas emisiones que conlleva. La mayoría de los ICE utilizan gasolina o diésel como combustible, aunque el gas natural está empezando a coger forma debido a que tiene una mejor eficiencia y menores emisiones en la combustión. Este trabajo se va a centra únicamente en los vehículos convencionales con diésel o gasolina como combustible.

El funcionamiento de estos motores se basa en la quema de un combustible (gasolina si es un ciclo Otto o diésel si es un ciclo Diésel), que debido a su explosión empuja a un pistón que se mueve de forma lineal dentro de un cilindro y hace que gire el cigüeñal para obtener como resultado el movimiento de rotación. La gasolina se mezcla con el aire fácilmente, por lo que se produce la combustión con una sola chispa. Como resultado, el motor de gasolina tiene una bujía para encender la mezcla de aire y gasolina. Dentro del cilindro tendremos elementos como son las válvulas, los pistones, bielas, etc, que es donde se realizan los cuatro tiempos del ciclo termodinámico:

1. Admisión: El pistón baja del cilindro y aspira la mezcla de aire y combustible por medio de la válvula de admisión. En este momento la válvula de salida está cerrada.
2. Compresión: Se cierran las dos válvulas, sube el pistón y se comprime la mezcla. (hay energía potencial).
3. Explosión: La bujía emite una chispa en la mezcla que produce la combustión. El pistón baja y produce el movimiento.
4. Escape: Sube el pistón y la válvula de escape se abre, para poder expulsar los gases que se producen en la explosión.

Existen dos tipos de motores, los de cuatro tiempos y los de dos tiempos, pues se diferencia por el ciclo de trabajo que desempeñan:

- Motor de 2 tiempos: El ciclo termodinámico se desarrolla en cuatro etapas (admisión, compresión, explosión y escape), llevándose a cabo en dos movimientos del pistón de manera lineal, es decir, la fase de admisión y compresión se producen a la vez, al igual que la de explosión y escape. Estos motores solo tienen una válvula que hace la función de admisión y de escape, son más simples y como característica, el aceite está unido al combustible en una sola mezcla.
- Motor de 4 tiempos: En estos motores, las cuatro fases del ciclo termodinámico se realizan por separado, por lo que hay una explosión cada dos vueltas del cigüeñal. Tienen válvula de admisión y de escape. El motor de cuatro tiempos es el que más se utilizan en los vehículos en la actualidad.

La principal diferencia entre un ciclo Diésel y un Otto es la manera para lograr la explosión. En el ciclo Otto es necesario una chispa para encender la mezcla del combustible con la gasolina, en el ciclo Diésel se comprime el aire sin haber inyectado el combustible. Una vez el aire está comprimido, se utilizan inyectores de combustible para rociar combustible en el cilindro sin tener la necesidad de generar una chispa. Los motores diésel no tienen bujía, por lo que deben tener relaciones de compresión más alta para que garantizan que la mezcla de aire y combustible se comprima lo suficiente para hacer un encendido.

Otra de las diferencias importantes entre estos dos motores es que los de gasolina pueden alcanzar eficiencias de hasta un 30 % como máximo, en cambio en los motores diésel de última generación se han alcanzado eficiencias del 45%, pero la media está en el 35%.

Con respecto a la contaminación los motores de gasolina emiten monóxidos de carbono, dióxidos de carbono, óxidos de nitrógeno principalmente. A diferencia de los Diésel, estos emiten más óxidos de nitrógeno y menos óxidos de carbono. Siendo los óxidos de nitrógeno molécula muy peligrosas para los seres humanos.

4 SECTOR DEL TRANSPORTE

En el sector del transporte, como se ha visto anteriormente, el hidrógeno funciona como combustible en los motores de combustión interna o a través de las pilas de combustible. La diferencia más importante es que en los motores de combustión, aunque el hidrógeno sea considerado renovable, al producirse la combustión a elevadas temperaturas se emiten gases contaminantes. Sin embargo, las pilas de combustible son una técnica neutra en emisiones, la cuál es la que se implementa en los proyectos desarrollados en la actualidad y se van a analizar en este presente proyecto.

El hidrógeno juega un papel fundamental en la descarbonización del transporte, pues es uno de los tres vectores energéticos, compitiendo con el gas natural vehicular (GNL y GNC), biocombustibles (biometano) y la electrificación. Con respecto a la electrificación, como ventaja el hidrógeno presenta mayor autonomía y menos tiempo de recarga que los vehículos eléctricos de batería. Además, comparado con los biocombustibles, no necesitan grandes extensiones de terreno y minimiza el impacto en la calidad del aire.

La falta de madurez de las tecnologías, el coste que conlleva y las pocas infraestructuras está siendo el gran inconveniente del hidrógeno en este sector, aunque está comenzando a cambiar, pues ya se han alcanzado más de 1,1 GW en el mercado de las pilas de combustible.

Una estrategia que está funcionando para la implementación de esta nueva tecnología, ha sido la construcción de infraestructuras para flotas de servicio público local, asegurándose un número exacto de vehículos además de reducir los puntos de suministro ya que suelen realizar recorridos cíclicos.

Las soluciones basadas en el hidrógeno dependen de la necesidad de cada medio de transporte, pudiendo implementarse mediante distintas soluciones al transporte ligero o pesado, ya sea terrestre, marítimo o incluso aéreo.

4.1 Transporte terrestre

4.1.1 Transporte Terrestre Ligero

La descarbonización del transporte debe centrarse en el vehículo privado, pues sus emisiones suponen un 50% del total de las generadas por el sector. El ejemplo más claro es el coche eléctrico impulsado por la pila de combustible (FCEV), explicado en el capítulo 3. Debido a su elevada inversión final, actualmente tiene un rango de aplicación muy específico que requieren autonomías que justifiquen dicha inversión. Sin embargo, se espera a largo plazo un despliegue masivo, ya que se espera una reducción clara del coste del vehículo.

Los pioneros en el mercado español fueron el Toyota Mirai y el Hyundai Nexo. El Mirai tiene una pila de combustible con una potencia máxima de 114 kW, cuenta con una capacidad de 5,6 kg de hidrógeno y una autonomía de 650 km. Tarda en repostar unos 5 minutos aproximadamente y consume 0,8 kg de hidrógeno cada 100 km. Su precio parte de 65.000 euros.

El Hyundai Nexo tiene una pila de combustible con una potencia de 95 kW una autonomía de 666 km y tarda en repostar 5 minutos. El consumo estimado es entre 0,8 y 1,2 kg de hidrógeno cada 100 km. Su precio es de 72.850 euros.



Figura 10: Hyundai Nexo. Fuente: (Hyundai)

También destaca el Honda Clarity el cual aún no ha llegado a España y que comenzó a comercializarse en varios mercados en el año 2016, el cual se encuentra en evolución pues ha dejado de producirse de momento ya que su éxito no fue el esperado porque su lanzamiento fue muy anticipado ya que la gran mayoría de mercados no contaba con infraestructuras de recarga. Cuenta con 580 km de autonomía, tardando 4 minutos en recargar.

Se espera marcas saquen al mercado vehículos movidos por hidrógeno, aunque ya se han anunciado algunos modelos como son:

- BMW i Hydrogen NEXT que se estima que podría llegar a comercializarse a principios de 2025 y que tiene como ventaja una autonomía similar a los motores de explosión, pues permite recorrer las mismas distancias que se hace con los motores térmicos sin tener que repostar hidrógeno. Cerca de 700 km de autonomía y entre 3 y 4 minutos de tiempo de recarga.
- Se trata del fabricante británico Jaguar, pues está trabajando en el modelo Jaguar Land-Rover Defender (hidrógeno), acaba de empezar las pruebas en Reino Unido. Es un todo terreno que utilizara exclusivamente el hidrógeno como fuente de energía oxidando el hidrógeno para producir

electricidad mediante el proceso de electrólisis. Se trata de una tecnología con una alta densidad de energía, permite repostar de manera rápida y tiene pérdidas de eficiencia mínimas frente a escenarios de clima extremos.

- La marca francesa Hopium, está llevando a cabo la fase final del desarrollo de su primer vehículo de hidrógeno, procedente de su modelo “Alpha 0”. Se anunció a finales de 2020 y cuyo nombre definitivo es “Hopium Machina”, ya ha iniciado un proceso de reserva para las primeras 1.000 unidades. Cuenta con un tiempo de recarga de aproximadamente 3 minutos y su precio asciende a 120.000 €
- Otro competidor presentado en el mercado es un coche biplaza llamado Rasa, de Riversimple una compañía galesa que pretende que este en el mercado en 2023 para lo que han recaudado 166 millones de euros.

Uno de los grandes inconvenientes de esta tecnología es la escasez de infraestructuras de repostaje como se ve en el capítulo 3.1, pero además el elevado precio del hidrógeno como combustible pues puede ser el doble y hasta el triple o cuádruple del precio de repostaje de los vehículos de combustión interna y eléctricos.

4.1.2 Transporte Terrestre Pesado

En el transporte terrestre pesado, que generalmente se trata de vehículos como autobuses o camiones de mercancía, el vehículo de pila de combustible de hidrógeno tiene ventaja frente al vehículo eléctrico debido a que presenta mayor autonomía y menor tiempo de recarga. Al igual que el transporte terrestre ligero suponía el 50% de las emisiones totales del sector del transporte, el terrestre ligero supone el 25% del sector. Sus características técnicas son similares a las del vehículo privado, en cambio se estima que su consumo sea entre 10 y 15 veces mayor, por lo que se emplea depósitos de 40-50 kg de hidrógeno.

Los vehículos que operan en circuito cerrado como los autobuses urbanos o de larga distancia y los camiones de mercancías o recogida de residuos son ideales para impulsar las hidrogeneras y desplegar una flota de vehículos. Para este tipo de actividades los vehículos eléctricos no se presentan como la mejor solución, pues al tiempo de recarga hay que añadirle la necesidad de recargar cada 3 horas de trayecto, la autonomía es pequeña. En ciudades con grandes despliegues de cargadores, los vehículos ligeros al no necesitar tanta autonomía existen un rango de utilización del vehículo puramente eléctrico, en cambio los vehículos pesados, por lo general, no cumplen esta idea.

El proyecto “JIVE” financiado por la Unión Europea pretende reemplazar los vehículos de combustible mediante la implantación de autobuses urbanos de pila de hidrógeno, desarrollando también las infraestructuras de recarga necesarias. El proyecto financia la diferencia de precio entre los vehículos de combustión y los vehículos de pila de combustible, cuyo coste se estima que se reduzca, pudiendo llegar a igualarse en los próximos 10 años. Esto ha colocado a Europa como el líder en la implantación de autobuses de hidrógeno. La figura 11 pretende ilustrar los objetivos de algunos países europeos.

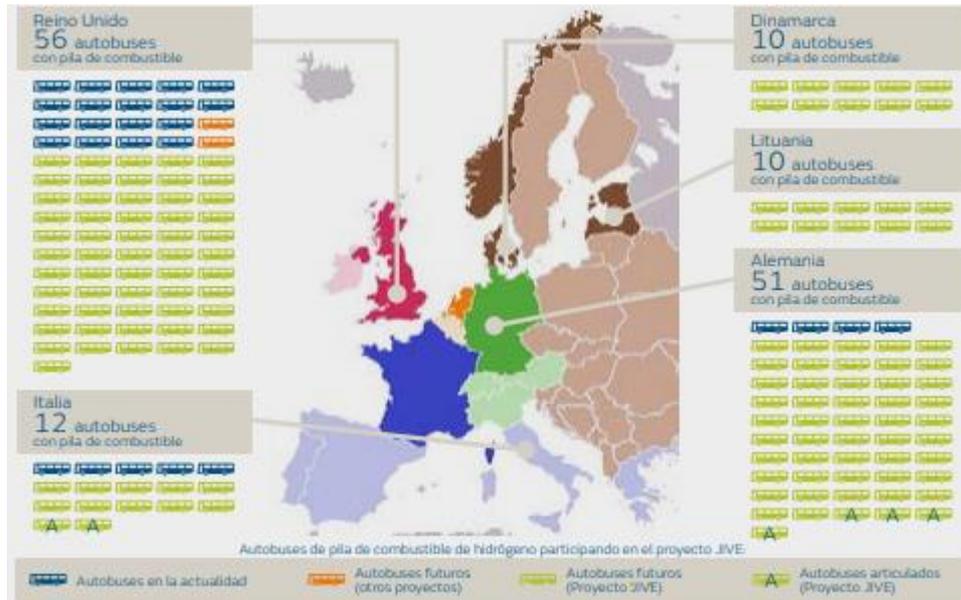


Figura 11: Objetivos del despliegue de autobús de hidrógeno en Europa. Fuente: (Fundación Naturgy)

En 2015 Toyota firma un acuerdo con el Comité Olímpico Internacional en el que se convertía en el proveedor de autobuses de hidrógeno, servicios y soluciones para el transporte de personas. Dos años más tarde, Toyota presenta el coche Mirai y el autobús de hidrógeno Sora.

Sora es el primer autobús de hidrógeno fabricado en grandes series, y en su interior cuenta con la tecnología TFCS (Toyota fuel cell system) que combina las pilas de combustible con la tecnología de los vehículos híbridos, ofreciendo mayor eficiencia que los vehículos de combustión interna. Como podemos ver en la figura 12, su forma no es rectangular como los autobuses convencionales, si no que presenta una forma estereoscópica. Es respetuoso con el medio ambiente y debido a la gran capacidad que presenta su sistema eléctrico puede llegar a ser utilizado como fuente de alimentación externa (9 kW de potencia máxima y suministro eléctrico de 235 kWh).



Figura 12: Autobús Toyota Sora. Fuente: (Toyota)

En 2003, se probó en Madrid, convirtiéndose en una de las 9 ciudades que participo en el proyecto europeo CUTE (Transportes Urbanos Limpios para Europa), el primer prototipo de autobús de pila de combustible de hidrógeno. El proyecto se centraba en todas las aplicaciones de la economía del hidrógeno, con un presupuesto de 52 millones reforzó la competitividad de la industria europea en los ámbitos importantes del uso de hidrógeno.

En cuanto a los camiones basados en pilas de combustibles los principales fabricantes en desarrollar esta tecnología han sido Toyota, Hyundai, Nikola y Mercedes-Benz. Hyundai y la compañía suiza H2 Energy crearon Hyundai Hydrogen Mobility (HHM), esta empresa está probando en Europa una flota de camiones Hyundai Xcient formada por 46 unidades. El camión Hyundai Xcient Fuel Cell está formado por dos pilas de combustible de 90 kW cada una y un motor eléctrico de 350 kW, además cuenta con 7 depósitos de hidrógeno con una capacidad total de 31 kg que tarde en recargarse entre 8 y 20 minutos, otorgándole una autonomía de 400 km, alcanza una velocidad máxima de 85 km/h. La figura 13 pretende ilustrar el funcionamiento del camión.



Figura 13: Tecnología de un camión propulsado por pila de combustible de hidrógeno. Fuente:(Hyundai)

4.1.3 Transporte Marino y Fluvial

Según las cifras aportadas por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Transporte (UNCTAD) el transporte marítimo supone el 90% del comercio internacional, pues es el sector más importante en el mundo del transporte y el comercio mundial. Es el sector de transporte menos contaminante y a la vez el más concienciado para reducir sus emisiones. El objetivo de reducir sus emisiones comenzó con la implantación del doble casco y el estudio de combustibles que perjudicaran menos al medio ambiente como es el Gas Natural Licuado.

Actualmente la tecnología del hidrógeno en el sector marítimo está en las primeras fases de desarrollo comercial, aunque ya se ha probado en la propulsión de embarcaciones de pequeño y mediano tamaño que

requieren menos energía que las grandes embarcaciones. El gran consumo de combustible necesario para las grandes embarcaciones puede llegar a alcanzar e incluso doblar la tonelada de hidrógeno diario, por lo que sería necesario licuar el hidrógeno a bordo, lo que requiere de tecnologías más complejas siendo un factor en contra para la transición. Sin embargo, se ha propuesto su uso como unidad de potencia auxiliar siendo su implementación más sencilla ya que no se necesita la criogenización del hidrógeno, ayudando a reducir las emisiones.

En cuanto a embarcaciones de menor tamaño, como ferris, la tecnología está más desarrollada pues es similar al transporte terrestre. El Energy Observer es el primer barco de propulsión eléctrica que combina el uso de las energías renovables y un sistema de producción de hidrógeno sin carbono a base de agua de mar. Frédéric Dahirel y Victorien Erussard transformaron el barco con el objetivo de convertirlo en un laboratorio experimental autosuficiente para investigar el hidrógeno como vector energético. En 2017 comenzó la vuelta al mundo durante 6 años sin emitir gases de efecto invernadero gracias a las energías renovables y el sistema de producción de hidrógeno. Como muestra la figura 14, el Energy Observer cuenta con una plataforma de 202 m^2 cubierta por paneles fotovoltaicos, la energía que generan dichos paneles se almacena en un sistema de baterías de ión-litio. Cuenta con dos velas Oceanwings, las cuales son de alas verticales de 12 m, con una superficie de $31,5 \text{ m}^2$ permitiendo un giro de 360° . Para ajustar su funcionamiento según las condiciones del viento se controlan a través de un ordenador. Cuando se mueve por la energía del viento, el agua hace girar una hélice hidrogenadora conectada al motor eléctrico cuya energía se almacena también en el sistema ión-litio. El agua del mar se separa en hidrógeno y oxígeno a través de un proceso de electrólisis empleando la energía almacenada en las baterías. El hidrógeno es utilizado en las pilas de combustible (desarrolladas por Toyota) para alimentar el motor eléctrico.

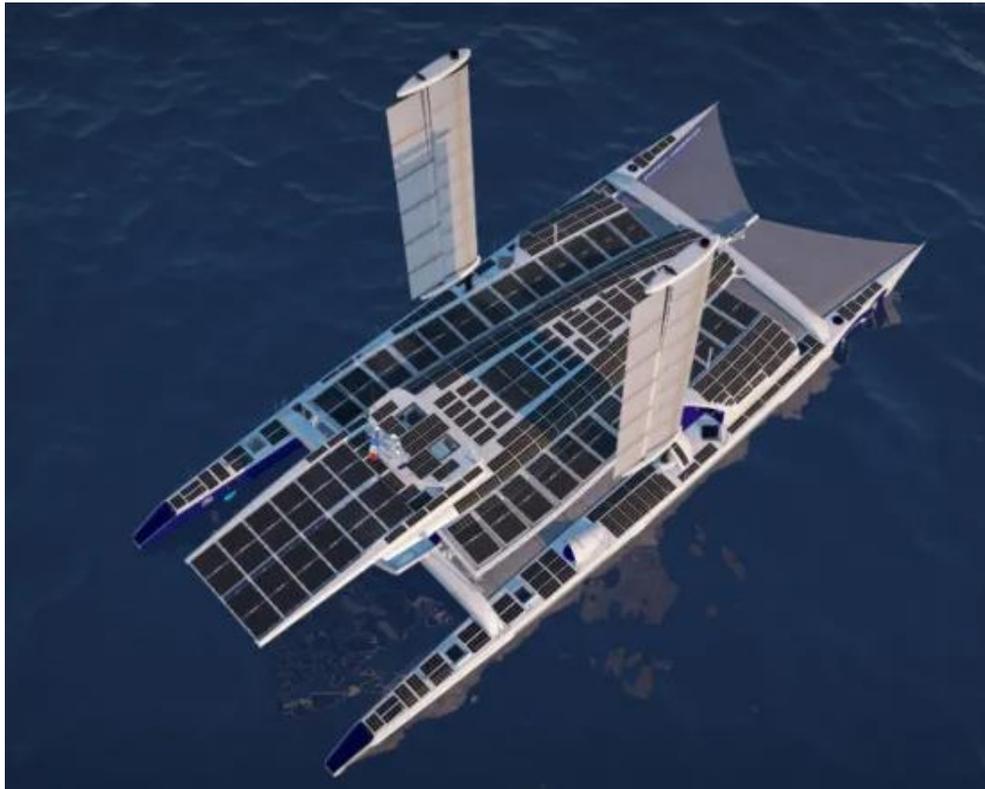


Figura 14: Catamarán Energy Observer. Fuente: (Energy Observer)

Kawasaki junto con la colaboración de Iwatani Corporation, Shell Japan y J-Power lanzaron el primer barco de hidrógeno líquido del mundo transportando $1.250 m^3$ de hidrógeno líquido enfriado a $253^\circ C$ bajo cero en contenedores aislados al vacío. Mide 116 metros, pero además funciona con motores Diesel, por lo que su energía no está libre de emisiones.

En 2019 ABB presentó el primer barco fluvial del mundo que funciona únicamente con pila de hidrógeno. El objetivo de estos proyectos es demostrar que las pilas de combustibles son una solución práctica y viable para impulsar embarcaciones medianas que transportan más de 100 pasajeros.

Además, los puertos y aeropuertos son un punto clave para la transición energética con la implementación del hidrógeno. Suelen ser infraestructuras participadas por empresas tanto públicas como privadas, involucrando a empresas del sector energético y del transporte. La demanda de energía es muy elevada, pues funcionan las 24 horas del día los 365 días del año por lo que se convierten en un escenario perfecto para introducir el hidrógeno y ayudar a la transición energética. Existen numerosas oportunidades de descarbonización en los puertos y aeropuertos debido a sus numerosas actividades. Las grúas, remolcadores de contenedores y vehículos son algunos ejemplos los cuales consumen grandes cantidades de energía y actualmente funcionan con combustibles fósiles o empleando tecnologías híbridas.

4.1.4 Transporte Ferroviario

El sector ferroviario tiene como característica que está prácticamente electrificado, pues según el informe de

la CNMC a 31 de diciembre de 2020 la Red Ferroviaria en España (RFGI) cuenta con una longitud de 15.489 km, de los cuales 15.469 km pertenecen a ADIF y ADIF-AV, de este total de kilómetros solo un 35,8% no está electrificado. Los trenes eléctricos actuales se alimentan de energía eléctrica de la red para alimentar con ella a los motores eléctricos o baterías. El tren de hidrógeno surge como una alternativa a los trenes actuales para nuevas rutas o rutas no electrificadas ya que supone un gran ahorro debido a la costosa inversión que supone electrificar las rutas.

En 2016, la empresa alemana Alstom presento el primer tren de pasajeros basado en la tecnología de hidrógeno llamado Coradia iLint. Se trata de un tren libre de emisiones de CO2 y una alternativa a la energía diésel, es alimentado por una pila de hidrógeno, la cual solo emite vapor y agua condensada con unos niveles. Tan solo dos años después, en 2018 entró en servicio comercial en Alemania y se caracteriza por sus elementos innovadores como es el almacenamiento de energía flexible en baterías o la conversión de energía limpia. Fue diseñado para líneas no electrificadas o parcialmente electrificadas, permitiendo una operación de trenes limpia garantizando altos niveles de rendimiento.

España trabaja en el reto de incorporar trenes de hidrógeno renovable para ayudar en la descarbonización de este transporte. Además, como ventaja principal es que se podrá utilizar los más de 5.000 km de línea ferroviaria que aún está sin electrificar cuya inversión superaría los 2.500 millones de euros.

El propio tren puede transportar los tanques de hidrógeno renovable para ser utilizado en las celdas de combustible que lo transforman en agua y electricidad para alimentar la locomotora. La figura 15 pretende ilustrar el funcionamiento de un tren basado en pilas de hidrógeno.

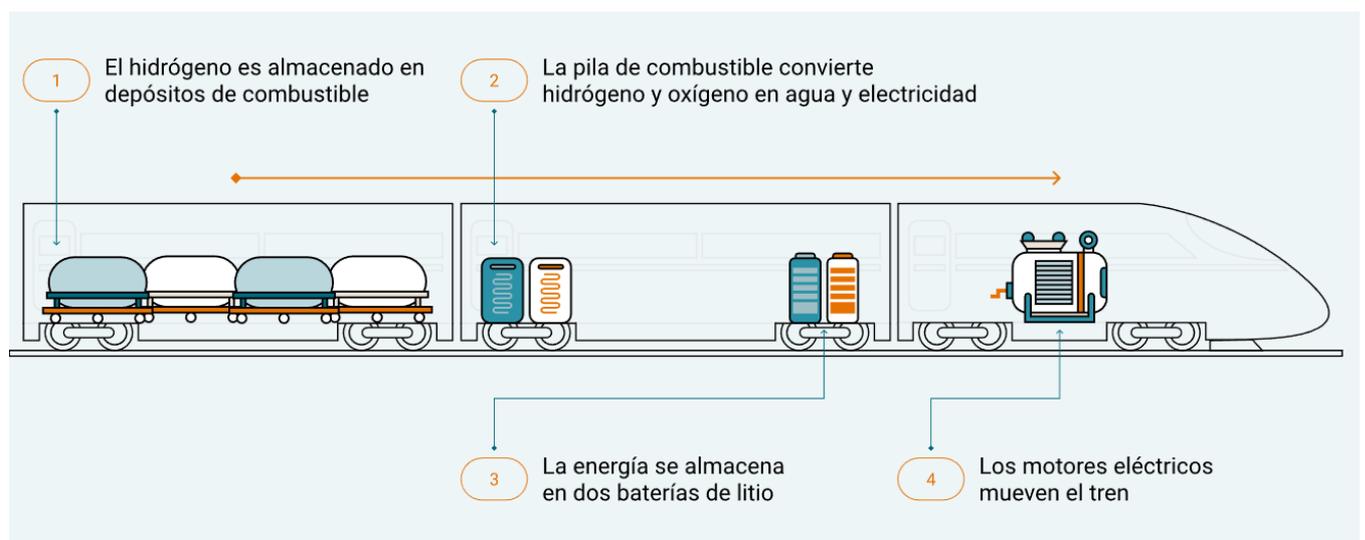


Figura 15: Funcionamiento de un tren de Hidrógeno. Fuente: (El Confidencial)

El gobierno español se marcó como objetivo, en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, para 2030 contar con al menos dos líneas de trenes de hidrógeno. La compañía Talgo junto con Repsol desarrollan un tren dual hidrógeno-

eléctrico conocido como Vittal-One cuyo funcionamiento se espera para el año 2023.

En Europa el 40% de los 80.000 kilómetros de vía férrea es transitado por trenes que funcionan con diésel, pues hay alrededor de 12.000 trenes sin electrificar. La Comisión Europea se ha marcado como objetivo que el 20% los trenes que funcionan con diésel lo hagan con hidrógeno renovable para 2030. En Reino Unido se ha desarrollado el proyecto HydroFLEX, dicho tren funcionará con hidrógeno y en ocasiones podrá operar en rutas electrificadas convencionales.

4.1.5 Transporte Aéreo

El sector aéreo, tanto aviones comerciales como de carga de mercancías, contribuye entre un 2 y 3% de las emisiones mundiales de CO₂, según el IPCC. Por esto el sector aéreo forma parte de los planes de reducción de emisiones. En este juego entre el hidrógeno como posible combustible.

La tecnología que utiliza el sector aéreo es muy específica, los motores para los aviones tienen que ser muy eficientes en cuanto a la potencia transmitida y el peso tanto del combustible como del motor, además de que son propulsado por queroseno.

Como explica el capítulo 2.2 el hidrógeno se puede almacenar en estado comprimido o estado líquido. Por las limitaciones que se dan debido al peso de los aviones, los depósitos de hidrógeno únicamente permitirían almacenar hidrógeno a 350 bar, en cambio en la automoción el hidrógeno se almacena a 700 bar. Esto quiere decir, que el hidrógeno comprimido a 350 bar presenta 11 veces menos energía por unidad de volumen que el queroseno. Esto no sería una opción, por lo que se recurre al hidrógeno líquido el cuál presenta una densidad energética tres veces menor que la del queroseno por unidad de volumen, pero almacena tres veces y media más energía que el queroseno por unidad de peso. Otro reto que presenta el hidrógeno en el mundo de la aviación es el almacenamiento, pues el hidrógeno líquido se almacena en enormes tanques cilíndricos, mientras que los aviones almacenan el líquido en las alas. Para solucionar este problema, se diseñan los depósitos de hidrógeno líquido en el cuerpo del avión, lo que implica un cambio en su forma perjudicando a la aerodinámica del avión.

El avión ruso Topolev Tu-155, fue el primer avión que utilizó el hidrógeno como combustible, el cual se quemaba en un motor desarrollado para ello. Este avión voló durante la década de los 90. Sin embargo, la otra tecnología es la utilización de pilas de combustible, el avión alemán HY4 efectuó su vuelo en 2016, transportando 9 kg de hidrógeno que se empleaban en 44 kW de celdas de combustible, para propulsar los motores eléctricos junto a 40 kW de baterías.

Airbus es una de las empresas que actualmente está apostando por esta nueva tecnología dentro del mundo de la aviación. Con el proyecto ZEROe saca tres conceptos de aviones híbridos con hidrógeno. En ellos se utiliza el hidrógeno líquido como combustible. Son propulsado por la combustión del hidrógeno a través de motores de turbinas de gas modificados. Están hibridado con pilas de combustible que crean energía eléctrica

complementando la turbina de gas.

El turbofán es el concepto más convencional, cuenta con dos motores turboventiladores híbridos de hidrógeno. El sistema de almacenamiento y distribución del hidrógeno líquido está ubicado en la parte trasera del avión. Está diseñado para transportar entre 120 y 200 pasajeros a una distancia de 2.000 millas náuticas, por lo que se podría emplear para vuelos continentales.

Turboprop es el segundo concepto que funciona con dos motores turbohélice híbridos de hidrógeno, impulsan hélices de 8 palas. El sistema de hidrógeno líquidos se encuentra en la parte trasera del avión. Está diseñado para transportar como máximo 100 pasajeros a una distancia de no más de 1.000 millas náuticas. Es un avión diseñado para los vuelos nacionales.

Por último, el tercer concepto conocido como Blended-Wind Body es un tipo de “Ala volante”, es decir una única ala fusionada con la cabina. Está formado por dos motores turboventiladores híbridos de hidrógeno. Los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido se almacenan debajo de las alas. Tiene una capacidad de 200 pasajeros a una distancia de 2.000 millas náuticas al igual que el turbofán. Su forma es la más diferente con respecto a los aviones convencionales como ilustra la figura 16.



Figura 16: Avión Airbus BWB. Fuente: (Airbus)

La aerolínea española Air Nostrum junto con la empresa Universal Hydrogen han llegado a un acuerdo para propulsar con hidrógeno los aviones de turbohélice de dicha aerolínea. Universal Hydrogen proporcionará las pilas de combustible y los motores eléctricos que sustituirán al motor turbohélice. La aerolínea proporcionará la aeronave Dash-8, la cual se convertirá en la primera aeronave eléctrica de uso comercial alimentada por una pila de hidrógeno. Se espera que este en servicio en 2025 con una capacidad de 60 pasajeros y una distancia de hasta los 1.000 km.

El gran problema que presentan los aviones es que no pueden cubrir vuelos de larga distancia, pues el

almacenamiento del hidrógeno implica mucha superficie. Para ello, al igual que en el sector marítimo se recurre a alternativas de hibridación en las que a la propulsión de queroseno se le apoye con hidrógeno, o la utilización de la pila de combustible como fuente de energía secundaria.

5 COMPARATIVA ENTRE VEHÍCULOS

Este capítulo va a comparar los diferentes tipos de vehículos que se comercializan actualmente en España, donde se analizarán cuestiones técnicas, ambientales y económicas para poder llegar a la conclusión de que vehículo sale más rentable en todos los aspectos con las condiciones actuales del país.

5.1 Autonomía

La gran ventaja que presenta los vehículos de hidrógeno frente a los EV son el tiempo de recarga y la autonomía que presentan. Actualmente los vehículos puramente eléctricos tienen una autonomía de hasta 743 km, pero son vehículos de gama alta en el mercado, a un precio que no es asequible para los consumidores medios.

La autonomía ha ido aumentando exponencialmente a lo largo de los últimos años, según el departamento de Eficiencia Energética y Energías Renovables de Estados Unidos se comercializan vehículos con una autonomía media de hasta 420 km y una autonomía máxima de 650 km como ilustra la figura 17, en la que se hace referencia a la autonomía en millas por lo que se debe multiplicar por el factor de 1.61, es decir, 260 millas*1.61= 420 km y 400 millas*1.61=650 km. Estos se han obtenido conforme al ciclo de homologación de consumos EPA, el cual es mucho más realista y estricto que el WLPT europeo.

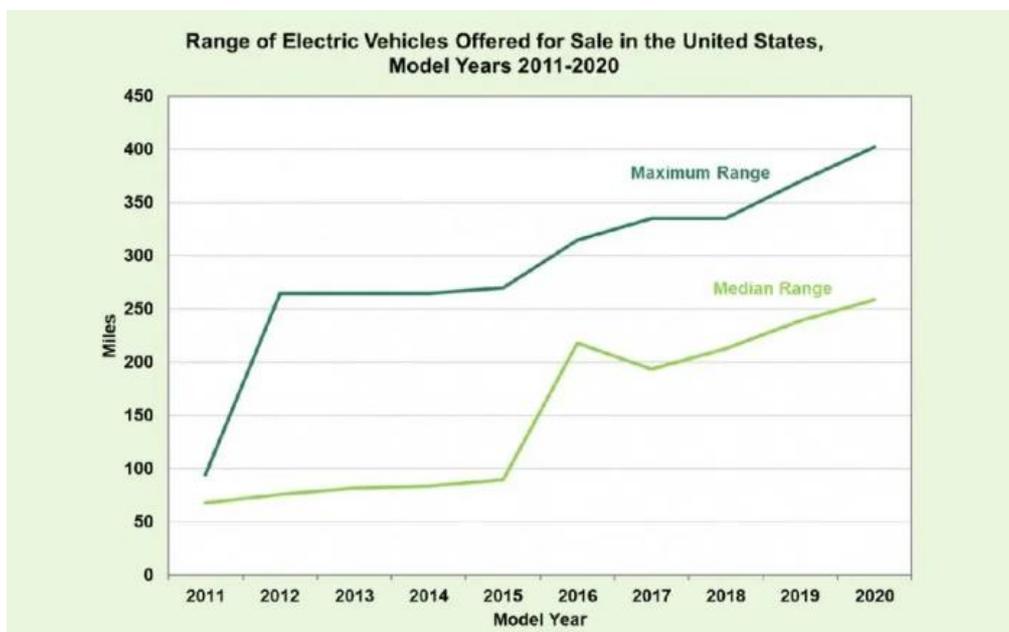


Figura 17: Autonomía media y máxima de los vehículos eléctricos en venta en EEUU desde 2011. Fuente: (Híbridos y eléctricos)

Sin embargo, estas autonomías hacen referencia a la teórica que es capaz de soportar el coche, teniendo en cuenta las condiciones más favorables de clima, el tráfico, las condiciones técnicas del coche como puede ser los neumáticos, el tipo de conducción, etc. Según unas pruebas realizadas con las siguientes condiciones:

- La prueba se realizó a las 11:30 horas
- Todos los coches condujeron en el programa de conducción “normal”
- El aire acondicionado estaba a una temperatura de 22°C
- La velocidad cruceo fue de 130 km/h
- Se demandaba una conducción siguiendo el tráfico y obviando frenadas y aceleraciones bruscas
- Cuando se llegaba el 5% de carga residual, el conductor debía abandonar la autopista para recargar el vehículo y registrar los datos.

En los datos recogidos, la diferencia entre la autonomía media declaradas por las cifras de WLPT y la autonomía real obtenida es del 30% de media como ilustra la tabla 4.

MODELLO	Vueltas a la GRA	AUTONOMIA CONSEGUIDA	AUTONOMIA WLPT	DIFERENCIA	BATERIA
BMW iX xDrive50	6,10	416 km	630 km	-34%	105,2 kWh
Mercedes-Benz EQS 580 4Matic*	5,78	394 km	673 km	-41%	107,8 kWh
Tesla Model Y Long Range	5,60	382 km	507 km	-25%	70,0 kWh
Ford Mustang Mach-E Extended Range AWD	5,57	380 km	540 km	-30%	88,0 kWh
Skoda Enyaq iV 80 iV	5,10	348 km	537 km	-35%	77,0 kWh
Audi Q4 Sportback 40 e-tron	5,01	342 km	534 km	-36%	76,6 kWh
Kia EV6 AWD	4,85	331 km	506 km	-35%	77,4 kWh
Volkswagen ID.4 Pro Performance	4,84	330 km	520 km	-37%	77,0 kWh
Hyundai IONIQ	4,76	325 km	485 km	-33%	72,6 kWh

Tabla 4: Resultado de las pruebas de autonomía para diferentes modelos de coches. Fuente: (Motor1 News)

Además, a diferencia de los vehículos de combustión interna que consumen más cuando circulan por ciudad que por autopista, los vehículos eléctricos al circular por ciudad con las numerosas frenadas aumentan la autonomía del vehículo debido al sistemas de frenada regenerativa. Por este motivo la autonomía ofrecida por los fabricantes se refiere a la ciudad por lo que es necesario aplicarle un factor corrector, que como muestra

la tabla 4 se estima del 30%.

Actualmente en España se comercializan vehículos como el Mercedes-Benz EQS, el cual en Europa bajo el ciclo WLPT tiene una autonomía de 743 km, pero la EPA lo rebaja a 563 km. Con una batería de 107,8 kWh útiles y un consumo medio de 16,6 kWh/100 km se estima una autonomía real de 649 km. También se llega hasta vehículos asequibles para el consumidor medio como el Opel Corsa-e con una autonomía de 330 km otorgada por el ciclo WLPT que son unos 240 km de autonomía real.

La autonomía de los vehículos híbridos no enchufables (HEV) es similar a los vehículos de combustión interna. Son vehículos que se recargan con las frenadas, además al arrancar o conducir a baja velocidad la electricidad almacenada en la batería alimenta el motor eléctrico por lo que es posible circular por ciudad algunos kilómetros en modo completamente eléctrico. En la tabla 5 se muestra la gama de vehículos eléctricos híbridos de la empresa automovilística Hyundai con sus respectivas autonomías.

	Motor	Consumo combinado	Autonomía con 50L. de combustible	Consumo WLTP a velocidad baja (hasta 56,5 km/h)	Autonomía en ciudad con 50L. de combustible
KONA híbrido	1.6 141 CV	4,9 litros/100 km	1.019 km	4,5 litros/100 km	1.110 km
KONA Diésel 48V	1.6 136 CV	5,8 litros/100 km	862 km	5,2 litros/100 km	961 km
KONA Gasolina 48V	1.0 120 CV	5,8 litros/100 km	833 km	7 litros/100 km	714 km

Tabla 5: Autonomía y consumo para las diferentes tecnologías del Hyundai Kona. Fuente: (Hyundai)

En cuanto a los vehículos híbridos enchufables (PHEV) disponen de una batería de gran capacidad que se recarga enchufándola a la red eléctrica y con la conducción como ocurre con los HEV, lo que les permite una autonomía eléctrica de unos 60 km, teniendo una autonomía total de unos 1.000 km.

En referencia a los vehículos de pila de combustible de hidrógeno se tiene en cuenta que actualmente pocos de ellos se comercializan en España. Los más destacados son el Toyota Mirai con una autonomía de 650 km, el Hyundai Nexo con 666 km y el Honda Clarity de 579 km de autonomía. En la tabla 6 se presenta una media de los vehículos según sus autonomías.

	BEV	HEV	PHEV	FCEV	ICE
Autonomía Media (km)	330	900	1000	650	1000

Tabla 6: Autonomía media para los diferentes tipos de vehículos. Fuente: (Elaboración propia)

5.2 Consumo y eficiencia

Actualmente el consumo medio de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno se sitúa en 29 kWh/100 km, lo que equivale en términos másicos a 0,9 kg de hidrógeno. Los 29 kWh/100 km es el consumo del coche teniendo en cuenta únicamente la conducción, sin embargo, como muestra la figura 18 para producir este hidrógeno hay que tener en cuenta las pérdidas en el proceso de electrólisis, transporte y distribución, que equivale a un 61%, es decir se necesitaría 48 kWh para mover un vehículo de hidrógeno cada 100 km.

Del 61% de energía que se obtiene en forma de hidrógeno tras el proceso de electrólisis, el 46% se pierde en los que se conoce como electrólisis inversa que es la conversión del hidrógeno en electricidad dentro de la pila de combustible, por lo que se necesitaría aproximadamente 96 kWh por cada 100 km, teniendo una eficiencia global del 30%.

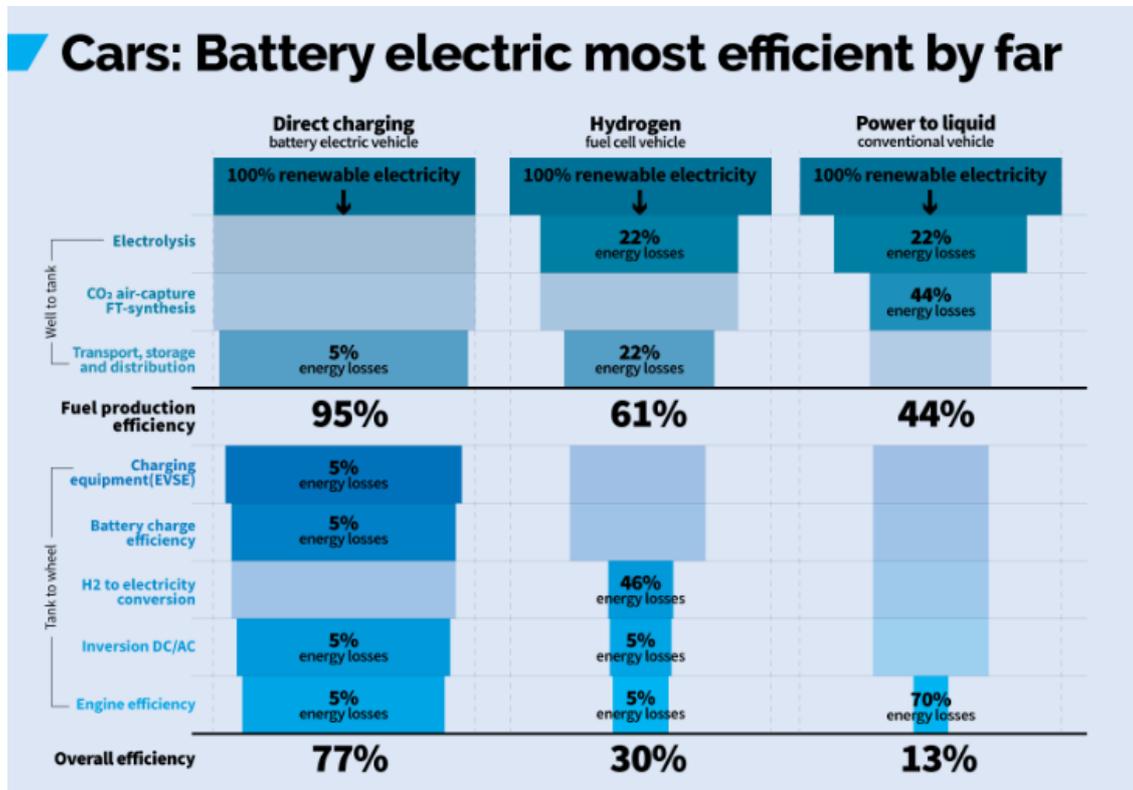


Figura 18: Eficiencia de las diferentes tecnologías de vehículos. Fuente: (Transport and environment)

Los vehículos eléctricos actualmente tienen un consumo medio de 14 kWh/100 km en la conducción. Una de las ventajas frente a los vehículos de hidrógeno es la eficiencia energética, pues las pérdidas por almacenamiento, transporte y distribución del combustible se trata solo del 5%. Además, hay que añadirle pérdidas en los equipos de carga, la batería, la energía que se pierde en la inversión de corriente continua a corriente alterna y pérdidas del motor, por lo que son vehículos con una eficiencia global del 77%, necesitando 18 kWh/100 km. Hay que tener en cuenta que dicha eficiencia corresponde cuando la electricidad que carga las baterías del vehículo eléctrico (BEV) tiene origen plenamente renovable, teniendo un 42% de eficiencia si el mix de generación eléctrica está basado en gas natural.

También se muestra en la figura 17 un proceso a partir de electricidad renovable se produjese hidrógeno y gas de síntesis para obtener un combustible que se emplearía para alimentar a un vehículo convencional de combustión interna. La figura muestra como hay un 70% de pérdidas por el motor, teniendo una eficiencia global del 13% por lo que resulta la alternativa menos eficiente.

Con respecto a los vehículos híbridos, como se explica el capítulo 5.1, la capacidad media de la batería de un vehículo híbrido enchufable (PEHV) es de 10 kWh permitiendo autonomías en funcionamiento puramente eléctrico de hasta 60 km, por lo que en ciudad este tipo de vehículos puede circular únicamente con el motor eléctrico debido al sistema de frenado regenerativo, lo que permite que se reduzca considerablemente el consumo de combustible a diferencia de los vehículos híbridos no enchufables (HEV) que tienen una batería con una capacidad media de 0,4 kWh lo que permite autonomías de unos 2 km aproximadamente utilizando únicamente el motor eléctrico. Los PHEV según el ciclo WLPT consumen una media de entre 1,6-1,7 l/100 km, para ello debe maximizarse el kilometraje usando las baterías, pero esto no siempre sucede, de hecho, el consumo típico de un vehículo PHEV particular es entre 4 y 4,4 l/100 km, mientras que en los coches de empresa puede llegar hasta los 8,4 l/100 km. Los vehículos híbridos HEV llegan a consumir entre 5 y 7,4 l cada 100 km.

Por otra parte, el vehículo híbrido enchufable como es una combinación de motor de combustión interna y uno eléctrico tendrá una eficiencia mixta entre el 31-49% según la utilización de estos. Con estas cifras se llega a la conclusión de que en un PHEV se llega a aprovechar el doble una unidad de energía que en un vehículo de combustión interna. En los vehículos híbridos el motor eléctrico ayuda a mejorar la eficiencia energética llegando a niveles del 30%. La figura 19 muestra un resumen de la eficiencia global de cada tipo de vehículo.

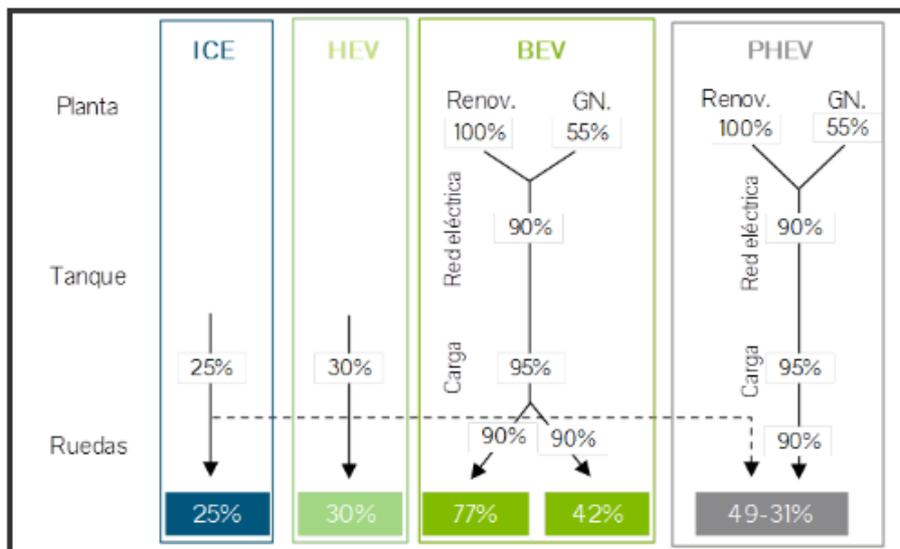


Figura 19: Comparación de la eficiencia del vehículo convencional con los diferentes tipos de vehículos eléctricos. Fuente: (Energía y sociedad)

Según muestra la figura 19 el vehículo convencional de gasolina con motor de combustión interna (ICE) tiene una eficiencia global del 25% entre pérdidas por rozamiento dentro del motor o los propios factores termodinámicos que limitan el rendimiento del motor. El consumo de los ICE suele estar entre 7-8 l/100 km para los vehículos de gasolina, mientras que para los diésel el consumo es entre 5-6 l/100 km. La diferencia de consumo por ciudad entre un vehículo de gasolina y uno de diésel es de media 1,8 l/100 km. En carretera la diferencia de consumo se sitúa en 1 l/100 km.

5.3 Precio del combustible

Con respecto al precio del combustible, el vehículo eléctrico siempre y cuando la recarga sea doméstica gana la batalla al vehículo de pila de combustible. Se debe diferenciar entre las dos tipologías de recarga existentes: recarga doméstica y recarga rápida. La recarga doméstica siempre va a ser más barata, aunque hay que añadirle unos costes añadidos referidos al coste de la instalación, el propio coste de la electricidad y la escasa demanda. Actualmente con las subidas de la luz, el precio de electricidad está en una media de 0,213 euros/kWh, tomando como referencia un vehículo con una batería de 60 kWh de capacidad, el coste de la recarga será de 12,78 euros. Además, hay que tener en cuenta los precios de la luz en los períodos de hora punta, llana o valle, pudiendo llegar a costar el coste de la recarga 21 euros. Recargar el coche eléctrico en puntos de recarga públicos (electrolineras) suele tener un coste superior. El precio lo fija la empresa encargada de la gestión (Ionity, Tesla, Repsol, Iberdrola, Endesa, Wenea...), suponiendo la recarga de un coche con una batería de 60 kWh un coste entre los 17,4 y los 26,76 euros.

En cuanto a los vehículos híbridos, dependiendo del tipo de conducción empleado, el precio por recorrer 100

km varía. Si la conducción es por ciudad, el vehículo se moverá principalmente con el motor eléctrico, disminuyendo el consumo de combustible. En carretera el consumo es similar a los vehículos de combustión interna.

Un vehículo de pila de combustible tiene una capacidad de unos 6 kilogramos de hidrogeno en su depósito, según el precio actual medio de las hidrogeneras europeas, el coste de recorrer 100 km sería de entre 8 a 10 euros. Por tanto, llenar el depósito de 6 kilogramos de hidrógeno tiene un precio que oscila entre 48 y 60 euros.

La siguiente tabla 7 muestra un resumen del tipo de vehículo con su consumo medio y el precio cada 100 km, destacando también los vehículos de gasolina y diésel, cuyo precio actualmente no para de subir debido a principalmente a la guerra que se está viviendo en Ucrania. Se puede observar que los vehículos convencionales son los menos rentables, ya que actualmente su combustible es el más caro.

COMBUSTIBLE	CONSUMO	PRECIO COMBUSTIBLE	PRECIO
HIDRÓGENO	0,9 kg/100 km	8-10 €/kg	7,2-9 €
ELÉCTRICIDAD (recarga doméstica)	18 kWh/100 km	0,213-0,35 €/kWh	3,834-6,3 €
ELÉCTRICIDAD (recarga rápida)	18 kWh/100 km	0,29-0,45 €/kWh	5,22-8,1 €
GASOLINA	7-8 l/100 km	1,7898 €/l	12,53-14,3 €
DIÉSEL	5-6 l/100 km	1,8608 €/l	9,3-11,16 €

Tabla 7: Características de los principales combustibles. Fuente: (Elaboración propia)

5.4 Tiempo de recarga

Con respecto al tiempo de recarga tanto los vehículos de combustión interna, como los de pila de combustible de hidrógeno y los vehículos híbridos no enchufables se recargan aproximadamente en 5 minutos. En cambio, el tiempo de carga de un coche eléctrico depende del tipo de batería y de la potencia del cargador. A continuación, se explican los 4 tipos de carga que existen actualmente:

1. Tiempo de carga lenta

Es la más habitual en el ámbito doméstico. Suele tardar entre 4 y 8 horas en cargar el vehículo. Para este tipo de carga es necesario un cargador con corriente alterna monofásica, donde 3,7 kW (230 V y 16 A) es la potencia mínima necesaria para que se pueda cargar el vehículo tardando aproximadamente 8 horas, hasta 7,4 kW que es la potencia recomendada para utilizar este tipo de cargador tardando aproximadamente 4 horas. El método más recomendable es instalar un punto de carga en casa pues es lo más seguro y rápido, aunque esta la opción de instalar un enchufe doméstico

conocido como Schuko la cuál casi no se utiliza ya que aumenta el tiempo de carga a entre 12 y 16 horas.

2. Tiempo de carga semi rápida

Este tipo de carga suele tardar en cargar el coche entre de 1 a 3 horas. Se necesita una corriente trifásica de 400 V, dependiendo de la capacidad de la batería del coche y la potencia tardara más o menos en cargar. La potencia mínima es de 11 kW tardando aproximadamente 3 horas en cargar el coche y con una potencia de 22 kW se reduce el tiempo a la mitad, llegando a cargar el vehículo completamente en una hora y media. Suele tardar algo más de media hora para los híbridos enchufables.

Este tipo de infraestructura suele estar en aparcamientos, centros comerciales, estaciones públicas y hoteles. El precio de recarga depende del día o la noche oscilando entre 0,22 y 0,4 euros/kWh. Además, se debe de tener en cuenta el consumo del propio vehículo.

3. Tiempo de carga rápida

Este tipo de carga te permite tener el vehículo cargado al 80% en aproximadamente 30 minutos. Este tipo de cargadores se encuentran en las estaciones de servicio, pues son cargadores especiales de corriente continua con una potencia de 50 kW (intensidades de 400 A y 125 V en corriente continua). Los precios oscilan entre 0,29 y 0,79 euros/kWh, aunque la media se encuentra entre 0,40 y 0,50 euros/kWh.

4. Tiempo de carga ultra rápida

Este tipo de carga es poco frecuente, no hay muchos puntos de carga actualmente. La batería tarda en cargarse completamente entre 5 y 10 minutos. Es una práctica muy útil para realizar viajes largos por carretera, se necesitan cargadores con una potencia de 150 kW y la intensidad de la corriente es 375 A o superior. Las cargas super rápidas suelen tener costes más caros que el resto de las cargas, con un precio medio de 0,45 euros/kWh.

5.5 Infraestructura de recarga

Uno de los grandes inconvenientes de los vehículos de pila de combustible como bien explica el capítulo 3.1.1, es la escasez de estaciones de recarga que hay actualmente en España, concretamente hay un total de 6 hidrogeneras, las cuales no son de uso público. El gobierno, con el plan de la “Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable” se ha marcado como objetivo instalar entre 100 y 150 hidrogeneras de acceso público para 2030.

Además, algo que tienen en común ambas tecnologías es que el número de infraestructuras de carga para los vehículos eléctricos es también bastante escaso en España. Según el informe “ANFAC Automoción 2020-2040”

establece que para poder responder al futuro parque electrificado y ayudar a la descarbonización del sector, España deberá multiplicar por 160 el número de puntos de recarga, incorporando más de 830.000 en 20 años, marcándose como objetivo un número de 110.000 puntos de recarga para 2025 y 340.000 para 2030. El número de puntos de recarga de acceso al público al cierre de 2021 es de 13.411. Este dato es muy inferior al objetivo de 28.240 puntos de recarga para 2021, requisito marcado para poder alcanzar los 340.000 puntos en 2030, para poder abastecer de manera eficiente los 5 millones de vehículos electrificados marcados para el PNIEC.

Además, el 88% de la red actual de recarga de uso público son cargadores carga lenta, es decir de potencias iguales o inferiores a 22 kW. A final de 2021 solo existían 109 puntos de recarga rápida con potencias superiores a 150 kW. Estas infraestructuras de recarga son imprescindibles para ayudar al mercado del vehículo electrificado ya que permite recargar los vehículos en tiempos similares a los vehículos de combustión interna.

El desarrollo de la infraestructura de carga de vehículos eléctrico se puede analizar observando el barómetro de la electromovilidad desarrollado por ANFAC, el cual nos permite realizar una comparación con de la penetración del nivel de desarrollo de las infraestructuras de carga tanto para España y sus comunidades autónomas, como para un conjunto de países de la Unión Europea los cuales tienen relevancia en este sector. Este barómetro mide el grado de desarrollo de la infraestructura de recarga pública según el número de puntos de recarga.

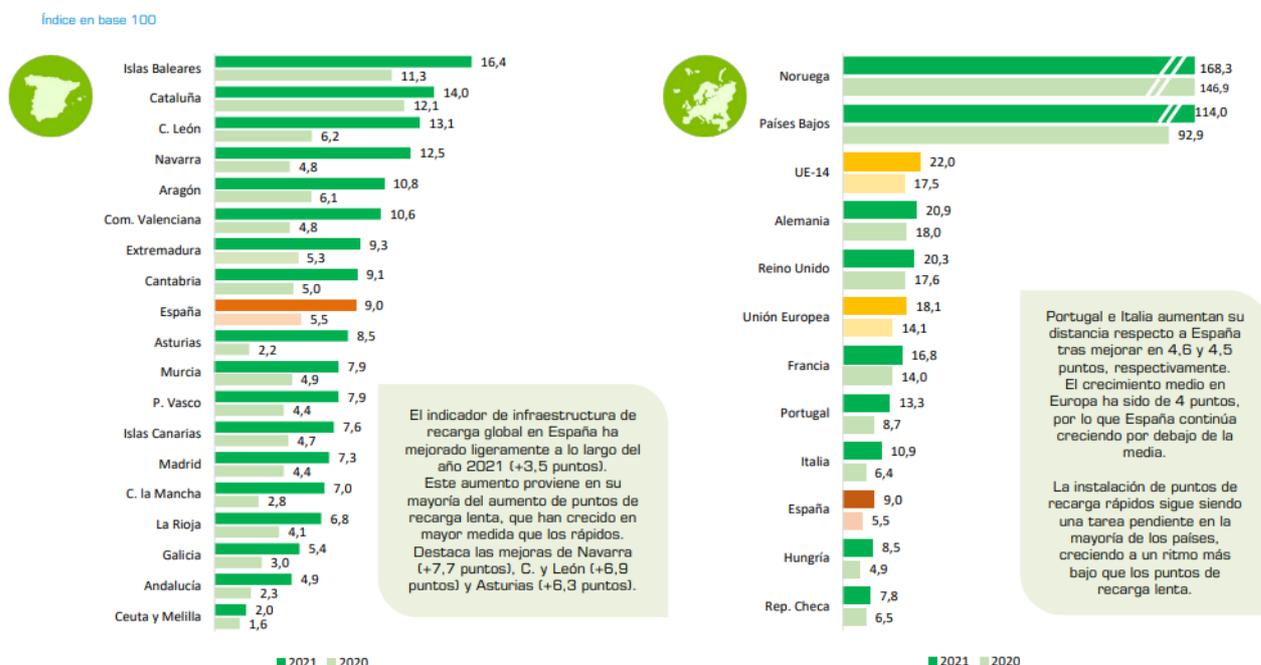


Figura 20: Indicador de Infraestructura de Recarga. Fuente: (ANFAC)

La figura 20 corresponde con el Indicador de Infraestructura de Recarga que evalúa el estado actual considerando un objetivo de 3,4 puntos por cada 1.000 personas, donde las Islas Baleares encabezan la lista

de la comunidad con más infraestructuras, mientras que Ceuta queda última con un dato mínimo. España aún no ha desarrollado una red de infraestructuras de recarga con la suficiente calidad y cantidad de potencia para impulsar el desarrollo del vehículo eléctrico. Se muestra en la figura X que al cierre de 2021 España ha crecido por debajo de la media con 3,5 puntos con respecto 2020. La media europea ha sido de 4 puntos, con países como Portugal e Italia mejorando en 4,6 y 4,5 puntos respectivamente.

En cuanto a las infraestructuras de recarga de los vehículos de combustión interna, España cuenta con 11.810 estaciones de servicio que ofrecen gasolina y diésel a lo largo y ancho de todo el país, completando una red de recarga completamente desarrollada. Con una media de 8 surtidores por gasolinera y teniendo en cuenta que el tiempo de repostaje de estos vehículos es de 5 minutos, España cuenta con un número de estaciones de servicio suficiente para abastecer la demanda actual.

Se observa como el número de puestos de recarga de coche eléctricos es mayor frente al número de gasolineras, pero es importante diferenciar entre electrolinería y punto de recarga. Pues los puntos de recarga son el equivalente a los surtidores de gasolina, son simples instalaciones que se encuentran en parkings, supermercados, lugares públicos, etc. Las electrolinerías cumplen la función de gasolineras, suele ofrecer puntos de carga más rápida, a un precio mayor y están establecidas en puntos estratégicos. El número de electrolinerías es mucho menor al total de puntos de recarga, por lo que también es inferior al número de gasolineras.

5.6 Emisiones

Para los vehículos de pila de combustible, se puede calcular las emisiones que produce teniendo en cuenta de donde proviene el hidrógeno. Actualmente el 50% del hidrógeno producido se conoce como hidrógeno gris procedente del reformado de gas natural, cifra que aumenta al 80% cuando se refiere al hidrógeno producido para el sector del automóvil. Se puede considerar que la producción de hidrógeno gris tiene unas emisiones superiores a 10-11 kgCO₂eq/kgH₂ generado, una cifra que no concuerda con los objetivos climáticos. De las emisiones del proceso 2/3 partes provienen de la reacción química y la tercera parte restante de la quema de combustible para obtener la temperatura necesaria para el reformado. Para equiparar, la combustión de 1 kg de gasolina genera 3-4 kg de CO₂. Por lo tanto, como un vehículo de pila de combustible consume 0,9 kg de H₂ por cada 100 km, esto equivale a 0,009 kg de H₂ por kilómetro, emitiendo 100 g/km de CO₂ si el hidrógeno proviene del reformado de gas natural.

Si el hidrógeno utilizado como combustible es hidrógeno azul o verde, cuya diferencia se debe a que el primero proviene de fuentes fósiles y el otro de fuentes renovables inagotables, pero no tienen ninguna diferencia en el impacto en emisiones de gases de efecto invernadero pues los dos se obtienen con bajas emisiones de CO₂, las emisiones del vehículo pertenecerían a la fabricación de la batería y del propio coche, al igual que los vehículos eléctricos.

Los coches eléctricos no tienen emisiones locales, decir las que se producen durante su funcionamiento, pero si producen contaminación durante su fabricación y para generar la electricidad necesaria que los alimenta. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) la mitad de las emisiones de CO₂ de un vehículo eléctrico provienen de su fabricación, concretamente en la de su batería que suponen un extra en la huella de carbono en comparación con un vehículo de combustión interna.

Para conocer las emisiones de los vehículos eléctricos es necesario conocer la procedencia de la electricidad utilizada para propulsar el motor. En 2021 en España se generó 259.905 GWh, de los cuales un 46,7% se obtuvo a partir de fuentes de energía renovables, emitiendo 35.901.184 toneladas de CO₂ reduciendo un 0,5% la cifra de 2020. Si a la renovables le sumamos la energía nuclear (no emite CO₂), tenemos que el 68% de la electricidad se generó a partir de fuentes libres de emisiones de CO₂ como muestra la figura 21.

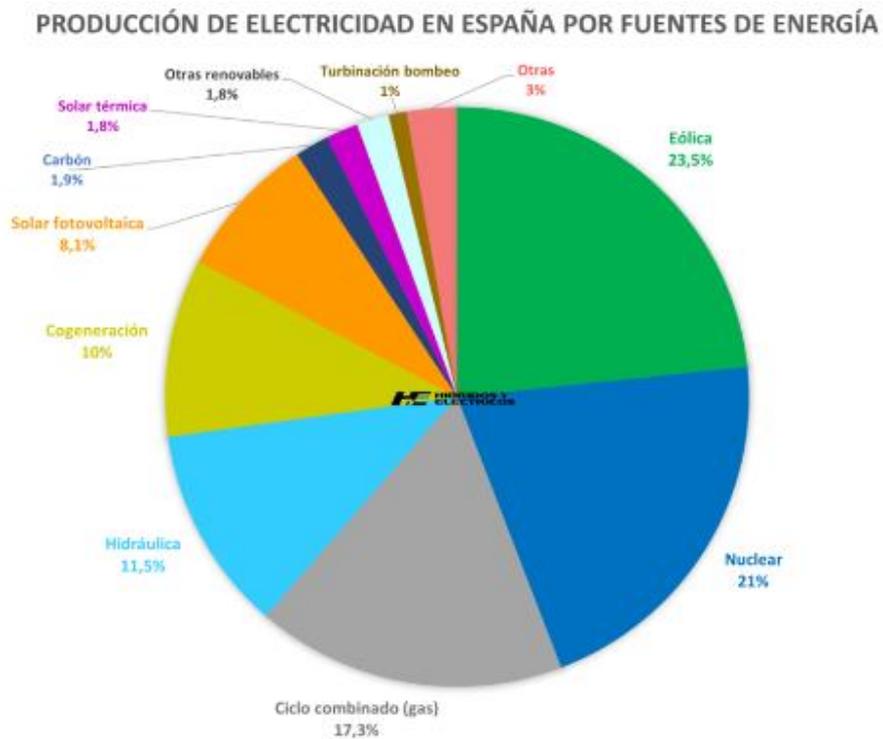


Figura 21: Esquema de la producción de electricidad en España por fuentes de energía. Fuente: (Híbridos y eléctricos)

Con estos datos resulta que para producir 1 kWh conllevó emitir a la atmosfera 0,138 kg de CO₂ de media. Otro factor a tener en cuenta son las pérdidas en el transporte de la electricidad, según Red Eléctrica Española estas pérdidas son del 1,85%, es decir para que lleguen 100 kWh al punto de consumo se necesita producir 101,89 kWh. Teniendo en cuenta que un coche eléctrico consume 18 kWh cada 100 km y teniendo en cuenta las pérdidas por transporte sería necesario producir 18,33 kWh para circular 100 km, lo que significa unas emisiones de 2,53 kg de CO₂ cada 100 km (25,3 g CO₂/km).

Con respecto a los vehículos convencionales, quemar un litro de gasolina supone emitir 2,3 kg de CO₂. Un

coche con un consumo medio de 6,5 l/100 km de gasolina estaría emitiendo 149,5 g de CO₂ por cada km recorrido, es decir un coche de gasolina emite 5,9 veces más CO₂ que un coche eléctrico que recargue la energía teniendo en cuenta el mix energético de España.

Con todo esto, se ha de tener en cuenta la huella de carbono que genera fabricar una batería, pues extraer las materias primas necesaria, refinarlas y convertirlas en una celda conlleva emisiones de CO₂. El fabricante Volvo ha publicado la huella de carbono que genera la fabricación de sus coches, tanto los vehículos eléctricos como los de combustión interna. La figura 22 muestra una comparación de la huella de carbono entre el vehículo eléctrico C40 Recharge y el vehículo de combustión interna XC40 ICE (E5 petrol). Se observa que la huella de carbono del C40 Recharge cargado con la electricidad del mix global es un 15 % más baja que la del XC40 ICE, si se carga con el mix eléctrico europeo la huella se reduce un 30%, mientras que, si se carga con energía eólica, la cual es un recurso renovable, la huella de carbono es un 50% más baja. Además, si la fabricación de los módulos de las baterías se incluye en la producción de los materiales y el refinado, el aumento de la huella de carbono sería prácticamente del 70%. Tomando como referencia los datos ofrecidos por Volvo y las emisiones de CO₂ del mix energético español, a los 68.036 kilómetros un coche eléctrico comenzara a reducir las emisiones totales en comparación con un modelo similar de gasolina.

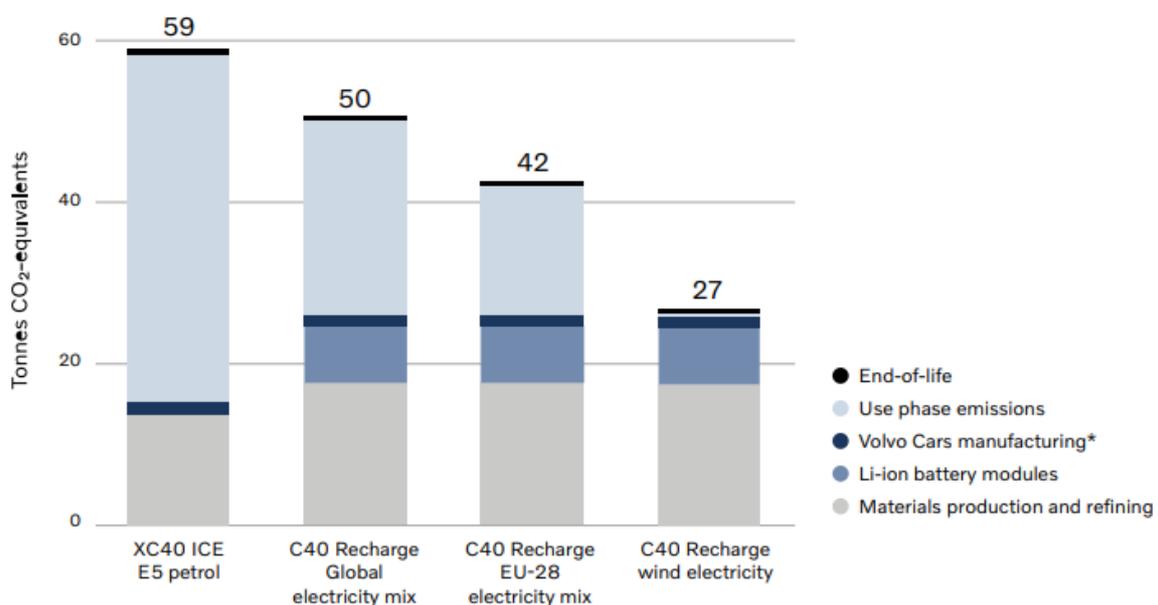


Figura 22: Esquema de las emisiones que emiten la gama de vehículos Volvo. Fuente:(Volvo Cars)

Con respecto a un híbrido enchufable, en la fase de fabricación contamina menos que uno eléctrico ya que tiene una batería de menor capacidad, en cambio tiene la desventaja de consumir más combustible durante su funcionamiento llegando a contaminar un 30% menos. Al tener la dualidad del motor eléctrico y el motor convencional reduce sus emisiones entre un 20 y un 30% menos que un vehículo de combustión interna. En

los híbridos no enchufables, la reducción de emisiones es entorno a un 10% respecto al vehículo convencional.

5.7 Precio

Para realizar una comparativa de los precios actuales de los distintos tipos de vehículos se toma como referencia los vehículos de la marca Hyundai, ya que refleja los precios actuales de una gama media. Al no haber el mismo modelo para todos los tipos de vehículos, se ha decidido elegir modelos de gama similar. Se observa que los vehículos eléctricos y sobre todo los híbridos que aún tienen un precio algo superior a su correspondiente ICE. El híbrido (HEV) es un 23% más caro que el vehículo de gasolina, mientras que el vehículo puramente eléctrico es un 26% más caro, teniendo una diferencia de un 3% entre estos dos tipos de vehículos. La tabla 8 hace referencia a los precios de compra en el año 2022, pero para esta comparativa se va a tener en cuenta los costos asociados al ciclo de vida del vehículo. Además, muestra como el vehículo de pila de combustible actualmente no tiene un precio competidor del resto de vehículos, siendo un 74,55% más caro que el vehículo de combustión interna.

Tipología	Modelo	Precio
HEV	KONA híbrido eléctrico	24.290,00 €
HEV	IONIQ híbrido eléctrico	23.685,00 €
PHEV	IONIQ híbrido enchufable	25.715,00 €
BEV	KONA eléctrico	25.440,00 €
FCEV	NEXO	73.450,00 €
ICE (gasolina)	KONA	18.690,00 €

Tabla 8: Precio de 2022 de los diferentes coches Hyundai. Fuente: (Hyundai)

Además del coste del seguro, impuestos, mantenimiento del vehículo, etc. el elemento más importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar que vehículo comprar es el precio del combustible. Con respecto a los vehículos puramente eléctricos, aunque la recarga rápida tenga un precio por cada 100 km no muy lejano al precio del combustible convencional, la recarga doméstica y semi rápida permite precios mucho más inferiores que los vehículos convencionales. Además, este modelo tiene una batería de 39 kWh pudiendo llegar a 305 km en uso combinado y hasta 435 km por ciudad, según el ciclo WLPT. El Kona eléctrico de 39 kWh tiene un consumo medio de 14,3 kWh/100 km.

En cuanto a los vehículos híbridos, hay que tener en cuenta el modelo que se está comparando. En este caso, KONA HEV, cuenta con una batería de una capacidad de 1,56 kWh permitiéndole una autonomía con el motor eléctrico de unos aproximadamente 9 km, consumiendo entre 4,9 y 5,1 l/100 km de gasolina, pues la ventaja económica en términos de combustible no es mucha, aunque notarás la reducción de consumos y emisiones porque su motor eléctrico consigue que la dependencia del motor de combustión sea menor, además de que

los híbridos en conducción urbana reducirían mucho más el consumo de combustible debido al sistema de frenadas regenerativas las baterías se auto recargan. Pero también ahorran combustible en carretera ya que el motor eléctrico asiste al de combustión en determinadas circunstancias como, por ejemplo, al acelerar o reducir la velocidad, o si vas cuesta arriba el motor eléctrico y el de gasolina funcionan conjuntamente.

Actualmente, con el alza de los precios de las materias primas, a elevado el precio de las baterías a 135 €/kWh, estando en 2021 a 132 €/kWh. Este coste apenas se ve reflejado en los vehículos híbridos, ya que la batería media suele ser de 1,5 kWh, en cambio en los eléctricos la batería puede costarnos alrededor de 5.300 € en el caso estudiado de 39 kWh.

Con respecto a los PHEV, el IONIQ enchufable tiene una batería de 8,9 kWh (actualmente puede costar 1200 euros) que nos da una autonomía 100% eléctrica de hasta 52 km y 66 km en ciudad. Cuando no puede funcionar en modo eléctrico, funciona como híbrido teniendo un consumo de combustible de 1,1 l/100 km.

Un coche según la agencia Estado Unidense, Environmental Protection Agency, recorre de media 24.000 km al año. Para estimar los costes de conducción de cada tipo de vehículo, se tiene en cuenta los precios de combustible y electricidad de la tabla X, y se toma como horizonte temporal 10 años y una conducción media de 24.000 km al año. Se supone un precio medio constante para la electricidad y el coste de la gasolina. Para calcular el consumo del ICE de gasolina se coge los datos técnicos del fabricante (consume 6l/100 km), al igual el Hyundai Nexo de pila de combustible (1kg/100km con una autonomía de 666 km) Para calcular el consumo anual se utilizan las siguientes fórmulas:

$$Coste_{anual} = Distancia_{anual}(km) \times Consumo_{km} \left(\frac{l}{km} \right) \times Precio(€/l)$$

$$Coste_{anual} = Distancia_{anual}(km) \times Consumo_{km} \left(\frac{kWh}{km} \right) \times Precio(€/kWh)$$

$$Coste_{anual} = Distancia_{anual}(km) \times Consumo_{km} \left(\frac{kg}{km} \right) \times Precio(€/kg)$$

Se consideran precios medios de seguros estipulados por las aseguradoras, al igual que precios medios de mantenimiento del vehículo. La tabla 9 muestra los costes que tiene un vehículo a lo largo de un año.

Tipología	Combustible anual	Seguro anual	Mantenimiento anual	Coste del ciclo de vida a los 10 años
HEV	2.104,81 €	340 €	150 €	25.948 €
BEV (recarga doméstica)	1.030,00 €	340 €	107 €	14.770 €
BEV (recarga rápida)	1.269,00 €	340 €	107 €	17.160 €
ICE (gasolina)	2.577,31 €	340 €	330 €	32.473 €
ICE (diésel)	2.322,27 €	340 €	312 €	29.742 €
FCEV	2.160,00 €	340 €	107 €	26.070 €

Tabla 9: Costes del ciclo de vida de los diferentes tipos de vehículos. Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, en la tabla 10, se muestra el precio total al cabo de 10 años, añadiendo el precio de la compra de dichos vehículos. Se observa como los coches convencionales son los que más gastos conllevan teniendo en cuenta el coste de combustible y los mantenimientos que requieren. El coste de ciclo de vida de los vehículos eléctricos es más barato que los convencionales, pero el coste del propio vehículo teniendo en cuenta la batería todavía no iguala a los convencionales, aunque con los cálculos realizados, al cabo de 10 años estos vehículos salen más rentables. Los coches de pila de hidrógeno están aún muy lejos de poder competir con los convencionales o incluso con los eléctricos.

Tipología	Coste total
HEV	50.238,00 €
BEV (recarga doméstica)	40.210,00 €
BEV (recarga rápida)	42.600,00 €
ICE (gasolina)	51.163,00 €
ICE (diésel)	51.730,00 €
FCEV	99.520,00 €

Tabla 10: Coste total de los diferentes tipos de vehículos. Fuente: (Elaboración propia)

6 CONCLUSIÓN

Tras el estudio e investigación sobre la utilización y situación de los combustibles fósiles, hemos podido conocer la verdadera situación de estos. No podemos obviar que el horizonte temporal de la vida de estos combustibles es mucho más corto de lo que pensamos.

De otra parte, debemos ser conscientes de los efectos altamente nocivos para con el medio ambiente y el respectivo cambio climático. Lo que demanda, como ya había sido puesto de manifiesto desde hace años por el sector científico, la necesidad de sustituir estos combustibles, o al menos en un porcentaje elevado, por las energías renovables.

Ahora bien, este proceso se ha visto acelerado con la guerra de Ucrania, y la subida desproporcionada del precio del gas, así como la dependencia de Rusia en el suministro de este combustible.

Es en este momento dramático, derivamos todos nuestros esfuerzos a la adopción de las medidas necesarias, de manera que la utilización de otras fuentes de energía sea una alternativa real a la mayor brevedad posible.

Cabe destacar que, tanto en España como en la Unión Europea, el sector con mayor porcentaje de consumo energético es el transporte. Lo que exige una mayor y urgente adopción de medidas en este sector. Se persigue propulsar el hidrógeno como alternativa a los vehículos convencionales movidos por combustibles fósiles y ayudar a la descarbonización del sector del transporte. El hidrógeno funciona como combustible en los motores de combustión interna o a través de las pilas de combustible. La diferencia más importante es que en los motores de combustión, aunque el hidrógeno sea considerado renovable, al producirse la combustión a elevadas temperaturas se emiten gases contaminantes. Sin embargo, las pilas de combustible son una técnica neutra en emisiones, la cuál es la que se implementa en los proyectos desarrollados en la actualidad y se han sido analizadas de forma más detenida.

Parece una apuesta de gran respaldo, el uso del hidrógeno, al ser este un elemento químico simple y sin riesgo de agotarse. Además, el hidrógeno puede obtenerse de distintas formas, almacenarse y su campo de aplicación y uso es muy amplio, pudiéndose utilizar para diversas aplicaciones.

Toda la investigación y estudio llevado a cabo, lleva a tomar conciencia de la necesidad de abandonar con carácter de urgencia el uso de los combustibles fósiles dando paso a una nueva era presidida por uso de las energías renovables, por ser éstas fundamentalmente unas energías limpias, que protegen el medio ambiente frente a las agresiones que viene sufriendo como consecuencia de las emisiones de CO₂.

Por todo lo anteriormente mencionado, se debe poner completo foco en propiciar la transición hacia las energías renovables con la máxima urgencia en aras de salvar nuestro medio ambiente, frenar el cambio climático, y aliviar la crisis mundial que vivimos como consecuencia de las restricciones al suministro del gas y la elevación de su precio.

Bibliografía

- ¿Cómo funcionan los motores de los automóviles? | Kia Costarica. (s. f.). Kia Costa Rica. (<https://www.kia.com/cr/discover-kia/ask/how-do-car-engines-work.html>)
- ¿Cuánto tiempo tarda en cargarse un coche eléctrico? | Repsol. (2022, 5 septiembre). REPSOL. (<https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/recarga-electrica/>)
- ¿Cuántos kilómetros debe hacer un Coche al Año? | Carglass. (2021, 15 septiembre). Blog del Experto en Reparación y Sustitución de Lunas | Carglass. (<https://www.carglass.es/blog/coche-a-punto/cuantos-kilometros-hacer-coche-ano/>)
- 4.2. La eficiencia energética del vehículo eléctrico. (2021, 10 septiembre). Energía y Sociedad. (<https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>)
- 5.1.1 Consumo energético del transporte | OTLE. (2020). MITMA. (<https://observatoriotransporte.mitma.es/inform/es/2020/sostenibilidad-ambiental/-consumo-y-eficiencia-energetica/consumo-energetico-del-transporte>)
- Alstom Coradia iLint – the world’s 1st hydrogen powered train. (s. f.). Alstom. (<https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>)
- Amadoz, S. (2019, 12 abril). ¿Sabes cuánto cuesta al año tener un coche en propiedad? El Motor. (<https://motor.elpais.com/actualidad/gastos-coche-en-propiedad/>)
- ANFAC | Barómetro Electromovilidad 4º Trimestre 2021. (s. f.). ANFAC. (<https://anfac.com/publicaciones/barometro-electromovilidad-4o-trimestre-2021/>)
- AOP memoria 2021. (s. f.). [Diapositivas]. AOP. (<https://www.aop.es/memorias/2022/06/30/memoria-aop-2021/>)
- Asociación Española de Pilas de Combustible. (2018, 27 agosto). Pilas de Combustible de Acido Fosforico. APPICE. (<https://appice.es/pilas-de-combustible-de-acido-fosforico/>)
- Asociación Española de Pilas de Combustible. (2018, agosto 27). Pilas de Combustible de Carbonatos Fundidos. APPICE. (<https://appice.es/pilas-de-combustible-de-carbonatos-fundidos/>)
- Asociación Española de Pilas de Combustible. (2020, 9 abril). Pilas de Combustible de Oxidos Solidos. APPICE. (<https://appice.es/pilas-de-combustible-de-oxidos-solidos/>)
- Autonomía de coches híbridos: Todo lo que debes saber. (s. f.). Autonomía de coches híbridos | Zona ECO. (<https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-drive/tecnologia/autonomia-coches-hibridos>)
- Baranova, M. (2022, 15 marzo). Los coches eléctricos con más autonomía del mercado en 2022. (<https://neomotor.sport.es/coches/los-coches-electricos-con-mas-autonomia-del-mercado-en-2022.html>)

- Benito, J. L. de. (2021, 23 noviembre). *La recarga de un coche de hidrógeno. Toda la información que necesitas*. Hidrogeno verde. (<https://hidrogeno-verde.es/recarga-coche-hidrogeno/>)
- Blázquez, L. (2019, 19 diciembre). Kawasaki lanza al mar el primer barco de transporte de hidrógeno líquido. *Noticias.coches*. (<https://noticias.coches.com/noticias-motor/kawasaki-suiso-frontier-barco-de-transporte-de-hidrogeno/368985>)
- BMW i Hydrogen NEXT con pila de hidrógeno | BMW España*. (s. f.). (<https://www.bmw.es/es/topics/mundo-bmw/cultura-bmw/noticias/sostenibilidad/bmw-i-hydrogen-next-pila-hidrogeno.html>)
- BMW. (2021, 24 septiembre). *Fundamentos de los coches de hidrógeno | BMW.com*. (<https://www.bmw.com/es/innovation/coches-de-hidrogeno-asi-funcionan.html>)
- Camiones propulsados por hidrógeno*. (2022, 20 mayo). canal motor Mapfre. (<https://www.motor.mapfre.es/coches/nuevos-modelos-coches/camiones-propulsados-por-hidrogeno/>)
- Cánovas Sánchez, B. (2022, 7 febrero). El transporte marítimo una solución ante el cambio climático. En *IEEE*. (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8494520>)
- Carbon footprint report Volvo C40 Recharge . (s. f.). En *Volvo cars*. (<https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>)
- Chiari, L. & Zecca, A. (2011, 9 septiembre). Constraints of fossil fuels depletion on global warming projections. *ScienceDirect*. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421511004654>)
- CNMC. (2021, 9 diciembre). Informe anual del sector ferroviario (2020). En *CNMC*. (<https://www.cnmc.es/sites/default/files/3980698.pdf>)
- Diésel o gasolina: ¿qué comprar?* (2018, 24 agosto). Autocasión. (<https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/diesel-o-gasolina-que-debes-compar>)
- Díez González, P. (s. f.). *Principios básicos del vehículo eléctrico* [TFG]. Universidad de Valladolid.
- Diferencia entre motor síncrono y asíncrono*. (s. f.). (<https://illustrationprize.com/es/77-difference-between-synchronous-and-asynchronous-motor.html>)
- El vehículo eléctrico: elementos principales y funcionamiento*. (2019, 10 enero). Simon Electric. (<https://www.simonelectric.com/blog/el-vehiculo-electrico-elementos-principales-y-funcionamiento>).
- Fernández, S. (2022, 13 mayo). *El tren de hidrógeno renovable: el siguiente paso para modernizar el ferrocarril español*. *elconfidencial.com*. (https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2022-05-13/tren-hidrogeno-emisiones-repsol-bra_3423554/)
- Franco, J. C. (2022, 10 junio). *Los coches híbridos enchufables consumen realmente 3-5 veces más que en ciclo WLTP, sobre todo los de empresa*. *forococheselectricos*. (<https://forococheselectricos.com/2022/06/los-coches-hibridos-enchufables-consumen>)

[realmente-3-5-veces-mas-que-en-ciclo-wltp-sobre-todo-los-de-empresa.html](#))

García Prieto, S. (s. f.). *El futuro de los coches de hidrógeno* [TFG]. ICAI.

García Vicens, G. (2011,24 Octubre). Vehículos de hidrógeno. Perspectivas de futuro. (<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/15543>)

García, G. (2020, 7 mayo). *Así funciona el Energy Observer, un barco propulsado por hidrógeno y energías renovables*. Híbridos y Eléctricos. (<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/energy-observer-barco-hidrogeno-energias-renovables/20200424185445034708.html>)

García, G. (2020b, mayo 7). *Así funciona el Energy Observer, un barco propulsado por hidrógeno y energías renovables*. Híbridos y Eléctricos. (<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/energy-observer-barco-hidrogeno-energias-renovables/20200424185445034708.html>)

Greenpeace. (s. f.). *El gas y la guerra en Ucrania*. Greenpeace España. Recuperado 9 de septiembre de 2022, de (<https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/guerra-en-ucrania/el-gas-y-la-guerra-en-ucrania>)

Gutiérrez, D. (2022, 11 julio). *¿Cuánto CO2 emite (indirectamente) un coche eléctrico en España?* Híbridos y Eléctricos. (<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/curiosidades/cuanto-co2-emite-recarga-coche-electrico-espana/20220628102452059686.html>)

Ibañez, P. (2012, 6 enero). *«El motor de combustión es el más eficiente hoy»: FALSO*. Motorpasión. (<https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>)

Informe sobre la Brecha de Producción 2021 Resumen Ejecutivo. (2021). Production Gap. (https://productiongap.org/wp-content/uploads/2021/10/SEI_PG2021_ExecSummary_Spanish.pdf)

Jordi Llorca. (2010, julio). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. En UPC. UPC. (<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36579/9788498804287.pdf>)

La aerolínea española Air Nostrum firma un acuerdo para propulsar sus aviones con hidrógeno. (2021, 11 agosto). Híbridos y Eléctricos. (<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/aerolinea-espanola-air-nostrum-firma-acuerdo-propulsar-aviones-hidrogeno/20210805180738047710.html>)

La eliminación gradual y urgente de los combustibles fósiles es fundamental para proteger los derechos. (2022b, abril 4). Amnistía Internacional. (<https://www.amnesty.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2022/04/IOR4054052022SPANISH.pdf>)

La pila de hidrógeno: ¿Es el hidrógeno el combustible del futuro? (2020, 1 febrero). *Energía VM*. (<https://www.energyvm.es/la-pila-de-hidrogeno-es-el-hidrogeno-el-combustible-del-futuro>)

Lago, A. (2021, 21 diciembre). *Autonomía real del coche eléctrico, los resultados de la prueba*. Motor1.com. (<https://es.motor1.com/news/555811/prueba-autonomia-coche-electrico-resultados/>)

- León, C. D. J. Y. (s. f.). *Motor de combustión interna*. Energía y Minería. (<https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/motor-combustion-interna.html>)
- Linares Hurtado, J.I., & Moratilla Soria, Y. (s. f.). *El hidrógeno y la energía*. ICAI. (<https://www.kimerius.com/app/download/5781455897/El+hidr%C3%B3geno+y+la+energ%C3%ADa.pdf>)
- Llorente, F. B. (2020, 4 noviembre). El hidrógeno: un combustible global para el transporte. *Felipe Benjumea Llorente*. (<https://felipebenjumeallorete.com/el-hidrogeno-un-combustible-global-para-el-transporte/>)
- Llorente, F. B. (2020a, febrero 17). *Autobuses de hidrógeno*. Felipe Benjumea Llorente. (<https://felipebenjumeallorete.com/autobuses-de-hidrogeno/>)
- Llorente, F. B. (2020b, febrero 17). *El hidrógeno como combustible en el sector aeronáutico | Felipe Benjumea*. Felipe Benjumea Llorente. (<https://felipebenjumeallorete.com/hidrogeno-aerolineas>)
- Llorente, F. B. (2020b, noviembre 4). *El hidrógeno: un combustible global para el transporte*. Felipe Benjumea Llorente. (<https://felipebenjumeallorete.com/el-hidrogeno-un-combustible-global-para-el-transporte/>)
- Luike, C. (2020, 17 noviembre). *Comparación de los costes de mantenimiento del motor en el 2020*. Autofacil.es. (<https://www.autofacil.es/legal/comparacion-costes-mantenimiento-motor/195084.html>)
- Maeso- González, E. & Marchante-Lara, M. (2008, julio). Presente y futuro de las estaciones de suministro de hidrógeno. En *Universidad de Málaga*. (https://www.researchgate.net/publication/261472060_Presente_y_futuro_de_las_estaciones_de_suministro_de_hidrogeno).
- Martín, J. (2021, 22 junio). *El primer Land Rover Defender de hidrógeno va a comenzar la fase de pruebas este mismo 2021*. Motorpasion. (<https://www.motorpasion.com/coches-electricos/primer-land-rover-defender-hidrogeno-va-a-comenzar-fase-pruebas-este-2021>)
- Menna, M. (2021, 28 agosto). *Motor de combustión INTERNA | Tipos, partes y como funciona*. ComoFunciona | Explicaremos hasta cosas que NO existen! (<https://como-funciona.co/un-motor-de-combustion-interna/>)
- Modelos*. (s. f.). Hyundai. (<https://www.hyundai.com/es/modelos.html>)
- Montalvo, C. (2022, 21 enero). Los altos precios del gas aceleran la llegada del hidrógeno verde. *NIUS*. (https://www.niusdiario.es/economia/consumo/altos-precios-gas-aceleran-llegada-inversiones-hidrogeno-verde-energia-renovable_18_3269974393.html)
- Morante, J., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A. & Torrell, M., (s. f.). *Hidrógeno vector energético de una economía descarbonizada*. Fundación Naturgy (https://www.naturgy.com/files/LIBRO_HIDROGENO_Fundación_Naturgy.pdf)
- Mundial, M. (2022, 24 marzo). *¿Cuáles son los mejores coches de hidrógeno?* – canalMOTOR. (<https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/mejores-coches-hidrogeno/>)

- Mundial, M. (2022b, marzo 24). *¿Cuáles son los mejores coches de hidrógeno?* –. canalMOTOR. (<https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/mejores-coches-hidrogeno/>)
- Murias, D. (2022, 27 junio). *Estos son los 12 coches eléctricos con más autonomía que se venden en España*. Motorpasión. (<https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/estos-12-coches-electricos-autonomia-que-se-venden-espana>)
- Murias, D. (2022a, junio 22). *Los 11 coches eléctricos más baratos que se pueden comprar en España en 2022*. Motorpasión. (<https://www.motorpasion.com/compra-coches/11-coches-electricos-baratos-que-se-pueden-comprar-espana-2022>)
- NEXO Pila Combustible de Hidrógeno. (s. f.). Hyundai. (<https://www.hyundai.com/es/modelos/nexo.html>)
- Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (s. f.). MITECO. (<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>)
- Pastor, L. (s. f.). Tipos de vehículo eléctrico. (<https://luispastor.es/compartiendo/VE/pdf/Clasificacion.pdf>)
- Pilas de Combustible*. (2019, 7 febrero). Centro Nacional de Hidrógeno, (<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>)
- Plaza, D. (2022, 21 abril). *¿Qué es un coche PHEV y cómo funciona? Los que puedes comprar en España*. Motor.es. (<https://www.motor.es/que-es/phev>)
- Press Releases. (2022, 1 febrero). H2Stations.org. (<https://www.h2stations.org/press-releases/>)
- RACE. (2022, 8 junio). *¿Cómo funciona un coche eléctrico?* (<https://www.race.es/como-funciona-coche-electrico>)
- Reducir las emisiones de carbono: objetivos y acciones de la UE | Noticias | Parlamento Europeo*. (2022, 14 julio). (<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180305STO99003/reducir-las-emisiones-de-carbono-objetivos-y-acciones-de-la-ue>)
- Reducir las emisiones de carbono: objetivos y acciones de la UE. (2022, 14 julio). *Parlamento Europeo*. (<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180305STO99003/reducir-las-emisiones-de-carbono-objetivos-y-acciones-de-la-ue>)
- REEV: Coche eléctrico de autonomía extendida | Ford ES. (s. f.). (<https://www.ford.es/acerca-de/ford/ford-blog/reev-coche-electrico-de-autonomia-extendida>)
- Respuestas de la UE al cambio climático | Noticias | Parlamento Europeo. (2022, 17 junio). *Parlamento Europeo*. Recuperado 9 de septiembre de 2022, de (<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/priorities/cambio-climatico/20180703STO07129/respuestas-de-la-ue-al-cambio-climatico>)
- Roca, J. A. (2019, 25 junio). *ABB impulsa el primer barco fluvial del mundo propulsado por hidrógeno*. El Periódico de la Energía. (<https://elperiodicodelaenergia.com/abb-impulsa-el-primer-barco-fluvial-del-mundo-propulsado-por-hidrogeno/>)

- San Martín, J., Zamora, I., San Martín, J. & Aperribay, V. (s. f.). Aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible. UPV/EHU. (http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas_2/pilas_2.html)
- Toyota España. (2022, 9 septiembre). *componentes-coche-hidrogeno-toyota*. Toyota ES. (<https://www.toyota.es/world-of-toyota/articulos-news-events/componentes-coche-hidrogeno-toyota>)
- Toyota España. (s. f.). *Toyota Mirai - Coche hidrógeno | Toyota España*. Toyota ES. (<https://www.toyota.es/coches/mirai>)
- Wednesday's EU hydrogen strategy needs to prioritise hard-to-decarbonise transport modes*. (2021, 25 julio). Transport & Environment. (<https://www.transportenvironment.org/discover/wednesdays-eu-hydrogen-strategy-needs-prioritise-hard-decarbonise-transport-modes/>)
- World Energy Outlook 2021. Resumen ejecutivo. (2019, octubre). En IEA. (https://iea.blob.core.windows.net/assets/599abf72-a686-4786-9cc2-b05e05b8dc2b/WEO2021_ES_Spanish.pdf)