

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno

Autor: Paula Isabel Rosa Álvarez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno

Autor:

Paula Isabel Rosa Álvarez

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Titular

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

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno

Autor: Paula Isabel Rosa Álvarez

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 mi tutor

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia el apoyo incondicional durante estos años de estudio, a mi padre, a mi madre, y a mis hermanos. A Alejandro por animarme a tener siempre un nuevo objetivo. A los profesores que he tenido durante estos años, y en especial a mi tutor, Javier Pino, por su disponibilidad y dedicación.

Paula Isabel Rosa Alvarez

Sevilla, julio 2022

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio del estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno (HRS). En primer lugar, se analiza la situación energética actual, caracterizada por el agotamiento y subida de precio de los combustibles fósiles, así como la necesidad de buscar alternativas menos contaminantes con el medio ambiente. En segundo lugar, se estudia la evolución que ha tenido el vehículo de hidrógeno a lo largo de la historia, el hidrógeno como combustible, los diferentes tipos de vehículos de hidrógeno, así como los modelos actuales.

A continuación, se describe la hidrogenera, los componentes presentes en ellas, y las diferentes tipologías que existen, además de la situación actual de las HRS a nivel mundial, europeo, y en España. Y, para terminar, se recoge la normativa aplicable a las HRS también a nivel español, europeo, y mundial.

Abstract

In this work, a study of the state of the art of hydrogen service stations (HRS) is carried out. In the first place, the current energy situation is analyzed, characterized by the depletion and rise in price of fossil fuels, as well as the need to seek alternatives that are less polluting with the environment. Secondly, the evolution that the hydrogen vehicle has had throughout history, hydrogen as fuel, the different types of hydrogen vehicles, as well as the current models are studied.

Below is a description of hydrogen generation, the components present in them, and the different types that exist, in addition to the current situation of HRS worldwide, in Europe, and in Spain. And, to finish, the regulations applicable to HRS are also collected at a Spanish, European, and world level.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | 9 |
| Resumen | 11 |
| Abstract | 13 |
| Índice | 15 |
| Índice de Tablas | 17 |
| Índice de Figuras | 19 |
| Notación | 21 |
| 1. Introducción | 11 |
| 1.1. <i>Situación energética actual</i> | 11 |
| 1.2. <i>Desarrollo del vehículo de hidrógeno</i> | 14 |
| 1.2.1 Tipos de vehículos de hidrógeno | 21 |
| 1.2.2 Convertidor | 23 |
| 1.2.3 Freno regenerativo | 23 |
| 1.2.4 Modelos actuales de vehículos de hidrógeno | 24 |
| 1.3. <i>Objetivo</i> | 29 |
| 2 Descripción de una Hidrogenera | 31 |
| 2.1. <i>Componentes de una hidrogenera</i> | 32 |
| 2.2. <i>Tipologías de HRS</i> | 44 |
| 3 Análisis de situación de las hidrogeneras | 47 |
| 3.1. <i>Situación mundial</i> | 47 |
| 3.2. <i>Situación europea</i> | 50 |
| 3.3. <i>Situación en España</i> | 52 |
| 4 Normativa | 57 |
| 4.1. <i>Normativa en España</i> | 58 |
| 4.2. <i>Normativa en Europa</i> | 59 |
| 4.3. <i>Normativa mundial</i> | 59 |
| 5 CONCLUSIONES | 61 |
| Referencias | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1: Propiedades del hidrógeno</i> | 14 |
| <i>Tabla 2: Comparativa de la densidad energética de combustibles</i> | 15 |
| <i>Tabla 3: Características Hyundai NEXO [18]</i> | 24 |
| <i>Tabla 4: Características Toyota Mirai</i> | 26 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1: Emisiones CO2 globales (Fuente: IAE)</i> | 11 |
| <i>Figura 2: Estadísticas del consumo energético en diferentes sectores [5]</i> | 12 |
| <i>Figura 3: Estadística de las emisiones de dióxido de carbono en diferentes sectores [5]</i> | 12 |
| <i>Figura 4: Evolución del precio del combustible en España (Fuente: dieselgasolina)</i> | 13 |
| <i>Figura 5: Evolución del precio del combustible en España en el mes de junio 2022 (Fuente: dieselgasolina)</i> | 13 |
| <i>Figura 6: Métodos de obtención del hidrógeno [10]</i> | 16 |
| <i>Figura 7: Diferentes vías de producción, almacenamiento, entrega y uso final del hidrógeno [11]</i> | 17 |
| <i>Figura 8: Stock de vehículos de pila de combustible por región [12]</i> | 18 |
| <i>Figura 9: Stock de vehículos de pila de combustible por segmento [12]</i> | 18 |
| <i>Figura 10: Clasificación de vehículos [5]</i> | 19 |
| <i>Figura 11: Componentes HEV</i> | 20 |
| <i>Figura 12: Esquema EV</i> | 20 |
| <i>Figura 13: Componentes FCEV</i> | 21 |
| <i>Figura 14: Batería de vehículo FCEV</i> | 22 |
| <i>Figura 15: Diagrama de la pila de combustible</i> | 22 |
| <i>Figura 16: Esquema de control de FCEV [16]</i> | 23 |
| <i>Figura 17: Diagrama del flujo de potencia [17]</i> | 24 |
| <i>Figura 18: Hyundai NEXO [20]</i> | 25 |
| <i>Figura 19: Esquema Hyundai NEXO [20]</i> | 25 |
| <i>Figura 20: Toyota Mirai</i> | 26 |
| <i>Figura 21: Honda Clarity Fuel Cell</i> | 27 |
| <i>Figura 22: BMW i Hydrogen NEXT</i> | 28 |
| <i>Figura 23: Hopyum Machina</i> | 28 |
| <i>Figura 24: Hyperion XP-1</i> | 29 |
| <i>Figura 25: Coste de capital de la HRS en función de la capacidad</i> | 31 |
| <i>Figura 26: Esquema configuración HRS on-site [3]</i> | 32 |
| <i>Figura 27: Esquema HRS on-site [23]</i> | 32 |
| <i>Figura 28: Esquema HRS off-site [23]</i> | 33 |
| <i>Figura 29: Configuración de equipos HRS gaseoso</i> | 34 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 30: Configuración de equipos HRS líquido</i> | 34 |
| <i>Figura 31: Sección transversal del compresor. (a) compresor de pistón; (b) compresor de diafragma; (c) compresor lineal; (d) compresor de líquido iónico</i> | 35 |
| <i>Figura 32: Métodos de almacenamiento de hidrógeno</i> | 36 |
| <i>Figura 33: Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno</i> | 37 |
| <i>Figura 34: Tipos de depósitos de hidrógeno comprimido</i> | 38 |
| <i>Figura 35: Depósitos tipo I</i> | 38 |
| <i>Figura 36: Depósito tipo II</i> | 39 |
| <i>Figura 37: Depósito tipo III</i> | 39 |
| <i>Figura 38: Depósito tipo IV</i> | 40 |
| <i>Figura 39: Dispensador HRS</i> | 42 |
| <i>Figura 40: Características de la curva de preenfriamiento y tasa de aumento de presión [25]</i> | 43 |
| <i>Figura 41: Electrolizador</i> | 43 |
| <i>Figura 42: HRS on-site en Sarreguemines (Francia)</i> | 44 |
| <i>Figura 43: Clasificación HRS</i> | 45 |
| <i>Figura 44: Hidrogenera de uso público en Zaragoza [26]</i> | 46 |
| <i>Figura 45: Estaciones de hidrógeno mundiales según la presión de suministro [11]</i> | 48 |
| <i>Figura 46: HRS mundiales en el año 2020 [27]</i> | 48 |
| <i>Figura 47: Evolución histórica del número de HRS [28]</i> | 50 |
| <i>Figura 48: Evolución de las HRS en Europa [29]</i> | 51 |
| <i>Figura 49: Estaciones de hidrógeno en España (2022) [28]</i> | 52 |
| <i>Figura 50: Previsión HRS en España</i> | 53 |
| <i>Figura 51: HRS futuras España [33]</i> | 54 |
| <i>Figura 52: HRS Tenerife [34]</i> | 55 |
| <i>Figura 53: Promedio de días para obtención permisos y desarrollos de las HRS</i> | 57 |
| <i>Figura 54: Demanda mundial de hidrógeno por sector 2020-2030 [12]</i> | 62 |

Notación

| | |
|-----------------|--|
| HRS | Estación de repostaje de hidrógeno |
| BEV | Vehículo eléctrico de batería |
| HEV | Vehículo híbrido |
| EV | Vehículo eléctrico puro |
| FCEV | Vehículo eléctrico de pila de combustible |
| ICEV | Vehículo de combustión interna |
| H ₂ | Hidrógeno diatómico |
| CH ₄ | Metano |
| CE | Comisión Europea |
| CFRP | Polímero reforzado con fibra de carbono |
| PNNL | Pacific Northwest National Laboratory |
| PEMFC | Celdas de combustible de membrana de intercambio de protones |
| IEA | Agencia Internacional de la Energía |
| FR | Freno regenerativo |

1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se describe la situación energética actual, caracterizada por el agotamiento de los combustibles fósiles y la subida de precios de estos, alcanzando máximos históricos, se realiza un breve resumen de la evolución histórica que ha sufrido el vehículo de hidrógeno, se comentan las principales características y ventajas del hidrógeno como combustible, así como las cifras de los últimos años en cuanto a unidades existentes en funcionamiento. Además, se recoge la información de los diferentes tipos de vehículos de hidrógenos y los diferentes modelos que existen a fecha de hoy. Y, por último, para cerrar el capítulo se comenta el objetivo de este trabajo.

1.1. Situación energética actual

La situación energética actual se caracteriza por las altas emisiones asociadas al consumo cada vez más elevado de la población mundial. La población mundial y la urbanización global continúan creciendo, desde 2007, más del 50% de la población mundial vive en áreas urbanas, en 2014 había 28 megaciudades acumulando 453 millones de habitantes, y se espera que en 2030 sean 41 megaciudades. Uno de los problemas asociados a este aumento de población, es el incremento del transporte de personas y mercancías, y el impacto en las emisiones. El número de vehículos fabricados ha aumentado del año 2000 al 2019 en todo el mundo, de 41,22 a 70,47 millones por año [3]. En la siguiente figura se puede ver la evolución de las emisiones de CO₂ a nivel mundial desde el año 1990 hasta la actualidad, en la que se observa el continuo crecimiento de estas. En esta misma figura se puede observar la disminución de emisiones que hubo en el año 2020 como consecuencia de la pandemia Covid-19.

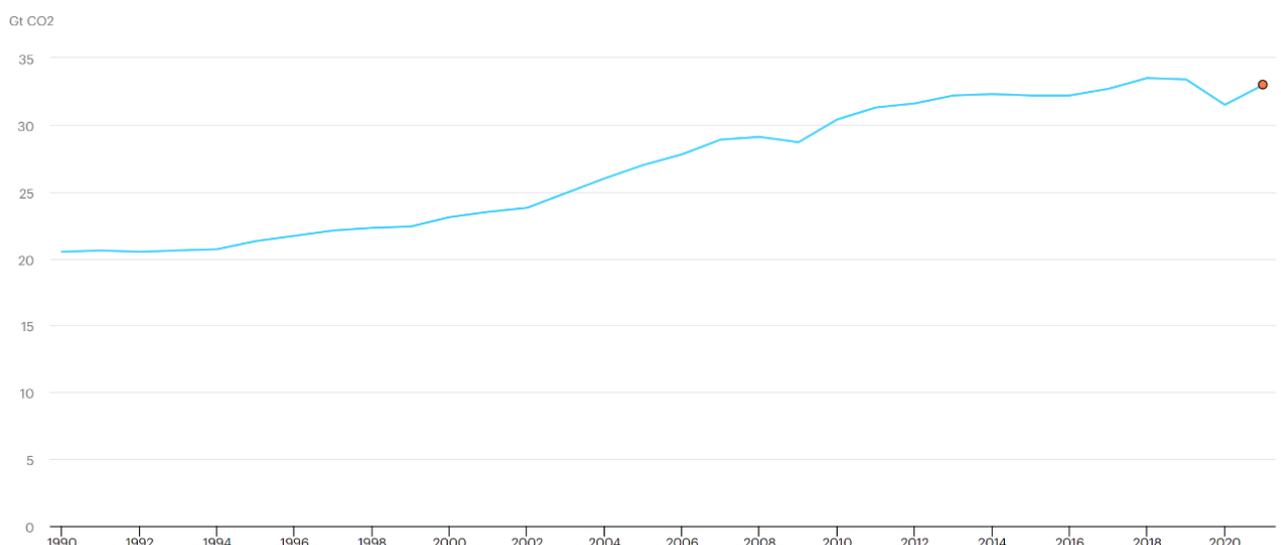


Figura 1: Emisiones CO₂ globales (Fuente: IAE)

El transporte es la segunda mayor fuente de emisión de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, los principales factores de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2015 fueron: generación de electricidad (29%), el transporte (27%) y la industria (21%). Dentro de este último, el transporte por carretera es la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea (81%), ya que el petróleo es la principal fuente de combustible [4]. En las siguientes figuras se observan los dos sectores con mayor consumo energético a nivel mundial y con mayor emisión de dióxido de carbono: el sector transporte y el sector industrial.

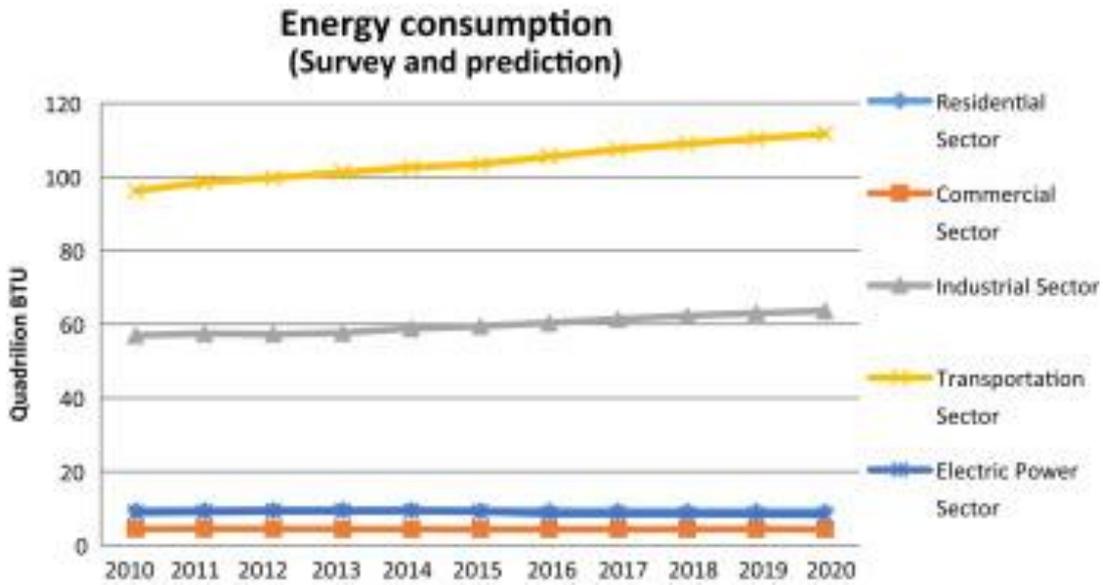


Figura 2: Estadísticas del consumo energético en diferentes sectores [5]

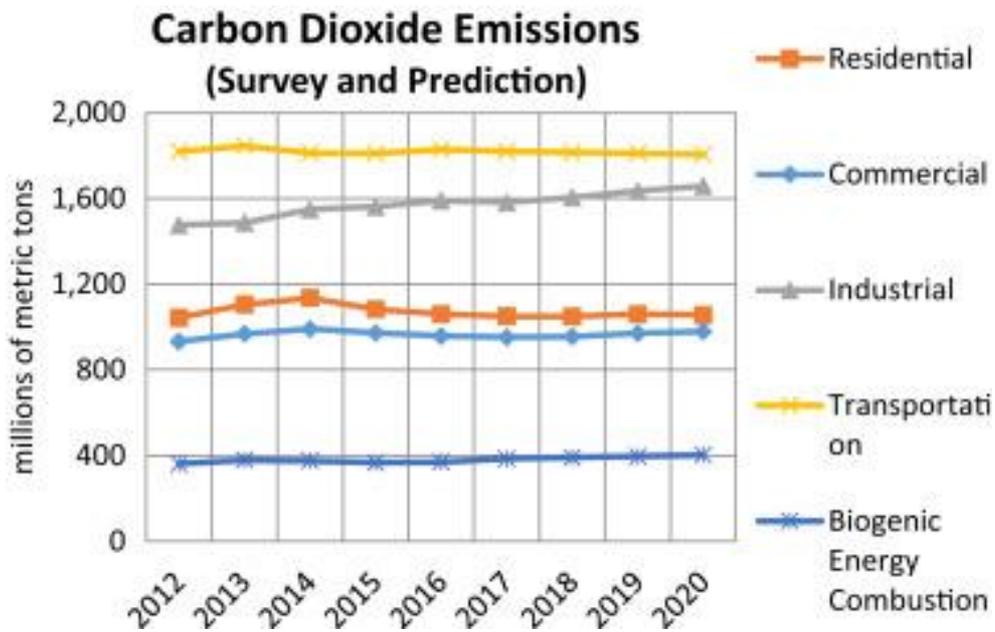


Figura 3: Estadística de las emisiones de dióxido de carbono en diferentes sectores [5]

El calentamiento global y la mala calidad del aire en las zonas urbanas son dos factores que impulsan a nuestra sociedad a la electrificación del transporte por carretera, especialmente en las grandes zonas urbanas. De hecho, el impacto de los BEV (Battery Electric Vehicle) aumenta en el mercado de forma lenta pero imparable desde 2010 y sus principales barreras son la autonomía, los precios minoristas, el tiempo de recarga de batería y la ausencia de infraestructura de carga [3]. Los problemas del calentamiento global y la calidad del aire, sumados a la subida del precio de los combustibles, hace que el interés por buscar alternativas a los combustibles fósiles sea cada vez mayor. En la *Figura 4*, se muestra la evolución del precio del combustible en España desde el año 2011 hasta la actualidad, en la que se puede observar la importante subida de los mismos, así como su tendencia alcista para los próximos años. También, en la *Figura 5*, se pueden observar los elevados precios que se están alcanzando durante el mes de junio 2022, superando los máximos históricos del país.

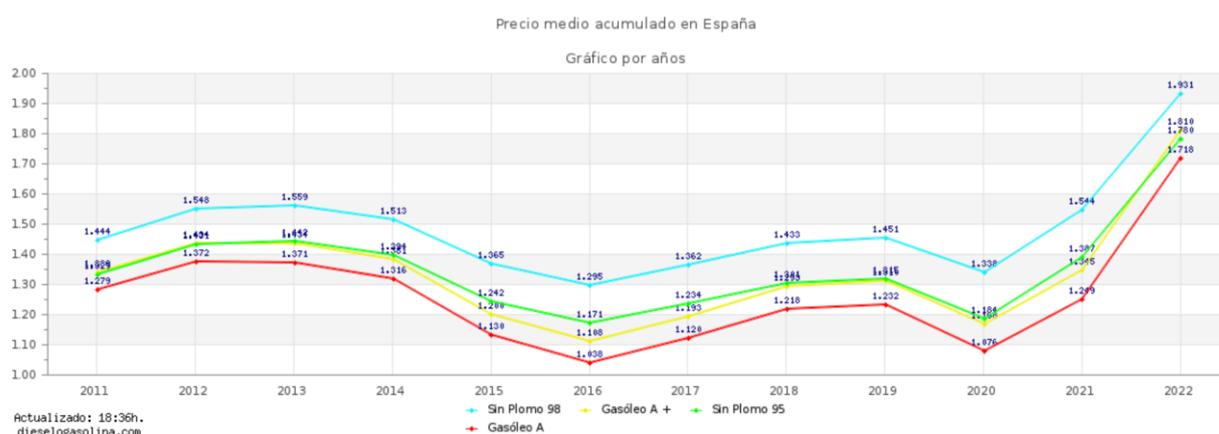


Figura 4: Evolución del precio del combustible en España (Fuente: dieselgasolina)



Figura 5: Evolución del precio del combustible en España en el mes de junio 2022 (Fuente: dieselgasolina)

La industria automotriz ha producido modelos con asistencia eléctrica para lograr mejoras en los estándares de emisiones como objetivos futuros mundiales. El proceso de adaptación de los vehículos en el proceso de electrificación se puede enumerar de la siguiente manera: tecnología start-stop, vehículo eléctrico microhíbrido (HEV), HEV enchufable, vehículo eléctrico (EV), y fuel cell electric vehicle (FCEV), como ultimo paso [6]. Hay un elevado número de iniciativas y políticas para apoyar el desarrollo y despliegue de tecnologías de

producción de hidrógeno verde y su uso en celdas de combustible para afrontar los desafíos de movilidad [7].

1.2. Desarrollo del vehículo de hidrógeno

El hidrógeno es la sustancia más abundante y simple del universo, es un elemento incoloro, inodoro e insípido, que, a diferencia de los combustibles convencionales a base de petróleo y derivados del gas natural, tiene una estructura molecular muy pequeña [8]. El hidrógeno se encuentra en abundancia en la naturaleza en su asociación con el oxígeno (agua) y, en menor medida, en su asociación con el carbono, por lo tanto, se puede producir en cualquier parte del planeta. Una característica que lo convierte en muy buen combustible es que es el vector energético con mayor densidad energética: por kg contiene 2,2 veces más energía que el gas natural, 2,75 veces más que la gasolina, y 3 veces más que el petróleo. Sin embargo, es el gas más ligero, lo que dificulta su funcionamiento, debido a su baja densidad. En la siguiente tabla se muestran algunas propiedades del hidrógeno:

| Propiedad | Valor |
|---|---|
| Nombre, símbolo, número | Hidrógeno, H, 1 |
| Categoría | No metal |
| Peso atómico | 1.008 |
| Electrones, protones, neutrones | 1, 1, 0 |
| Color, olor | Incoloro, inodoro |
| Toxicidad | Ninguno, asfixiante simple |
| Fase | Gas |
| Densidad | Gas: 0,089 g/l, líquido: 0,07 g/cm ³ |
| Relación de expansión de líquido a gas | 1:848 (condiciones atmosféricas) |
| Punto de fusión y ebullición | -259,14 °C, -252,87°C |
| Poder calorífico inferior (LHV) | 118,8 MJ/kg |

Tabla 1: Propiedades del hidrógeno

En la siguiente tabla se compara la densidad volumétrica y gravimétrica de energía de algunos combustibles más usados:

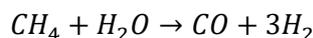
| Combustible | Energía por kg (MJ/kg) | Energía por litro (MJ/l) |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Hidrógeno (líquido) | 143 | 10,1 |
| Hidrógeno (700 bar) | 143 | 5,6 |
| Hidrógeno (p ambiente) | 143 | 0,0107 |
| Gas natural (líquido) | 53,6 | 22,2 |
| Gas natural (250 bar) | 53,6 | 9 |
| Gas natural | 53,6 | 0,0364 |
| Gasolina | 46,4 | 34,2 |
| Diesel | 45,4 | 34,6 |
| Metano | 55,6 | 0,0378 |

Tabla 2: Comparativa de la densidad energética de combustibles

Los principales inconvenientes del hidrógeno como combustible son, en primer lugar, que no se encuentra separado en la naturaleza a gran escala, y, en segundo lugar, su densidad es muy baja en estado gaseoso, por lo tanto, es necesario licuarlo, y esto lleva asociado un gasto energético. La cadena de valor del hidrógeno como combustible está formada por cuatro etapas: producción, compresión, almacenamiento y transporte.

1. Producción de hidrógeno: El hidrógeno puede producirse mediante distintos procesos químicos o bioquímicos, los más utilizados son el reformado de hidrocarburos y metanol y la electrolisis del agua.
 - Reformado de hidrocarburos y metanol: Aunque existen diferentes tipos de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos, el más típico es el que se describe a continuación, a partir de gas natural. El gas natural reacciona con vapor de agua sobre un catalizador de níquel, a temperaturas de 1200 °K y la presión total de 20-30 bar. Puesto que el gas natural contiene impurezas de azufre, se requiere una etapa previa de eliminación de ese contaminante para evitar el deterioro de la actividad catalítica. La corriente limpia de metano se hace reaccionar después en un reactor al que se incorpora un catalizador de níquel. El gas de salida es rico en hidrógeno, pero contiene cierta proporción de monóxido de carbono, que a su vez se transforma en otro reactor, incluso en dos, en hidrógeno adicional mediante reacción con vapor de agua.

El gas resultante tiene un contenido elevado de hidrógeno, junto a dióxido de carbono y cantidades mucho más bajas de metano no convertido y monóxido de carbono, usualmente 1% en volumen [9]. La reacción de este proceso es:



- Electrolisis de agua: Este proceso consiste en la separación del agua en sus elementos, hidrógeno y oxígeno, cuando se aplica una corriente eléctrica externa. El elemento principal para la producción de hidrógeno a partir de electricidad es el electrocatalizador [7]. Este proceso permite la producción de hidrógeno verde siempre que la electricidad utilizada en el proceso provenga de fuentes renovables. Más Adelante se profundiza sobre este proceso.
2. Purificación y compresión de hidrógeno: Para algunas aplicaciones prácticas, como vehículos de pilas de combustible, es necesario convertir el hidrógeno impuro en hidrógeno ultrapuro. Además, la compresión del hidrógeno es necesaria, ya que, como se ha comentado anteriormente, el hidrógeno tiene la densidad de energía volumétrica más baja, y de esta forma se logran densidades de energías altas y altos niveles de almacenamiento [7].
 3. Almacenamiento de hidrógeno: El almacenamiento suele ser en estado gaseoso o líquido, dependiendo de los volúmenes, la presión y la duración del almacenamiento [7].
 4. Transporte de hidrógeno: Las principales formas son, en semirremolques, en redes de gasoductos de hidrógeno, o barcos u oleoductos [7].

| Método de obtención del H ₂ | | Estructura (%) |
|---|---|----------------|
| Producción centralizada y suministro (vía carretera o tuberías) | | 45 |
| Producción distribuida | Electrolisis | 37 |
| | - A partir de la red eléctrica | 70 |
| | - A partir de energía fotovoltaica | 14 |
| | - A partir de energía eólica | 14 |
| | - A partir de otras energías renovables | 2 |
| Reformado | | 18 |
| TOTAL | | 100 |

Figura 6: Métodos de obtención del hidrógeno [10]

En la siguiente figura se muestran posibles rutas de suministro de hidrógeno. El hidrógeno puede producirse a partir de recursos fósiles, renovables y nucleares, puede almacenarse principalmente como gas comprimido o líquido criogénico, y entregarse a los usuarios mediante camiones o tuberías.

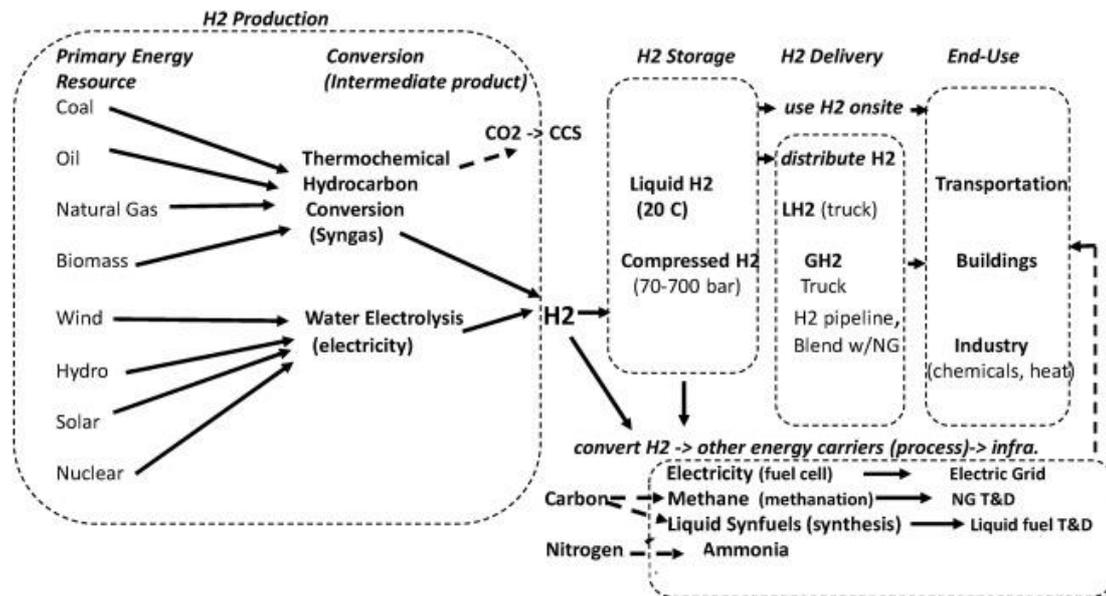


Figura 7: Diferentes vías de producción, almacenamiento, entrega y uso final del hidrógeno [11]

Una de las formas más sencillas de obtener hidrógeno es mediante la electrólisis del agua, separando los átomos de hidrógeno y oxígeno. Las pilas de combustibles son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno en energía eléctrica, su funcionamiento es opuesto al de la electrólisis. Existen diferentes tipos de pilas de combustibles, entre todos, el tipo PEM es la tecnología elegida para aplicaciones automotrices debido a su bajo rango de temperatura de operación (menos de 100°C), tamaño pequeño, alta eficiencia y amplio rango de operación.

El hidrógeno se conoce desde hace mucho tiempo como un combustible de transporte potencial bajo en carbono, pero ha sido difícil establecerlo en la mezcla de combustibles de transporte. Hasta la fecha, el uso del hidrógeno en el sector se ha limitado a menos del 0,01% de la energía consumida, y en 2020 los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) representaron una parte muy pequeña del stock mundial de vehículos totales (<0,01%), y de vehículos eléctricos (0,3%). Sin embargo, el mercado del FCEV está empezando a despegar [12]. A final de junio de 2021, había más de 40000 FCEV por las carreteras de todo el mundo. El número de vehículos movidos por hidrógeno creció un promedio del 70% anual entre 2017 y 2020, pero en 2020 el crecimiento de las existencias se redujo a solo el 40% y las matriculaciones de automóviles nuevos con celdas de combustible disminuyeron un 15%, lo que refleja la contracción del mercado de automóviles en general debido a la pandemia de Covid-19 [12]. Aún así, como se verá más adelante, el proceso de comercialización de vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV) en todo el mundo se ha acelerado significativamente.

En las siguientes figuras aparece la evolución del stock de vehículos de pila de combustible según diferentes regiones y por segmento, en los últimos años, y se puede observar como el número de vehículos va en aumento.

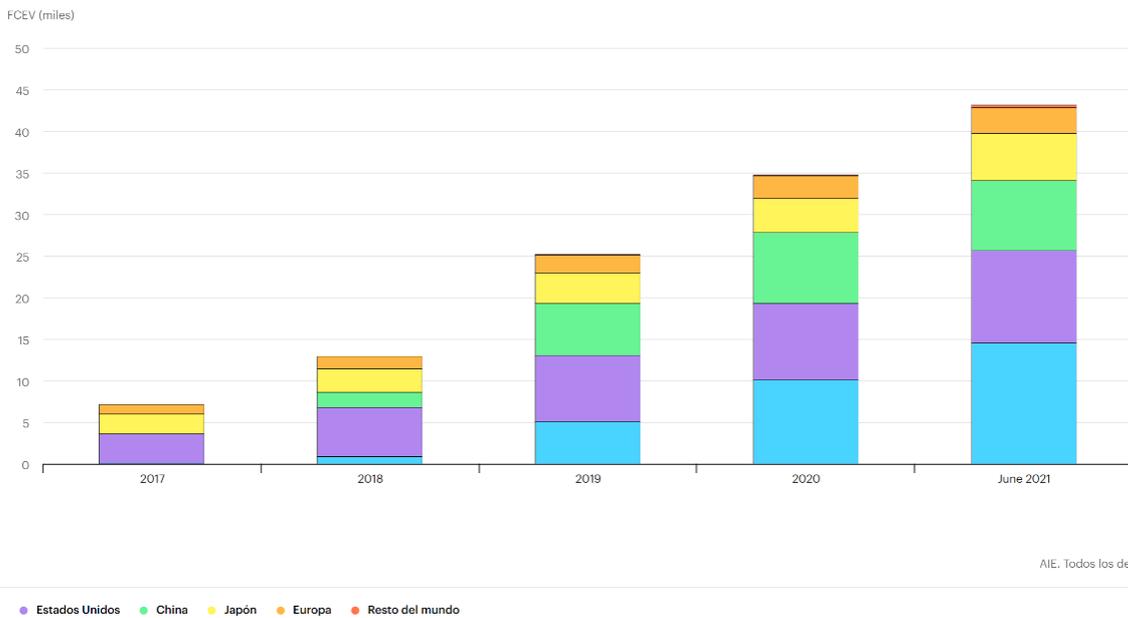


Figura 8: Stock de vehículos de pila de combustible por región [12]

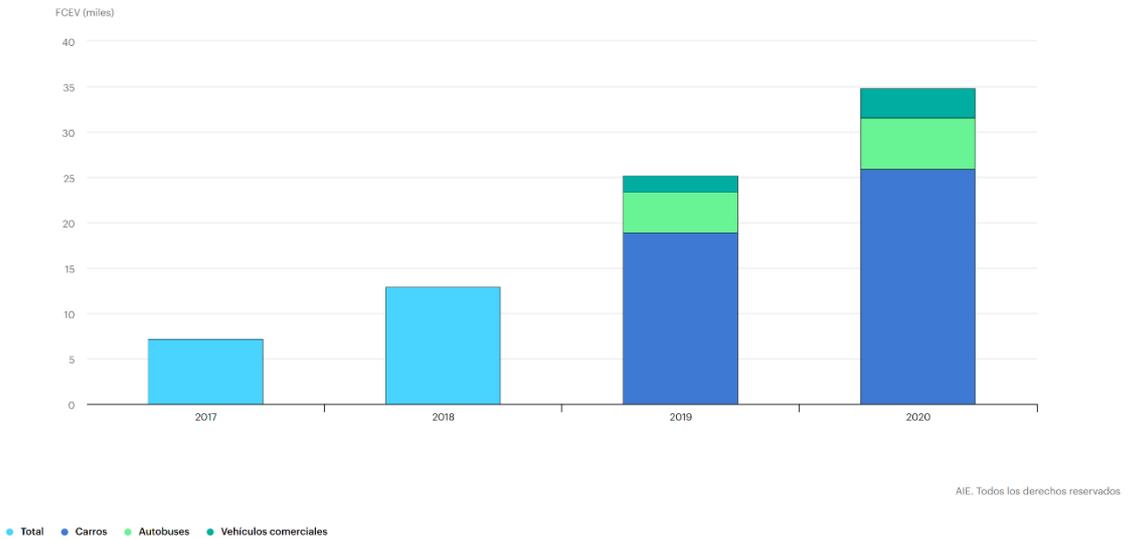


Figura 9: Stock de vehículos de pila de combustible por segmento [12]

La realidad es que existen muchos obstáculos que restringen la aplicación comercial de la energía del hidrógeno, entre ellos, la construcción de la infraestructura HRS (Hydrogen Refueling Station) es uno de los principales obstáculos, esto se debe a que el aumento de la tasa de penetración del mercado de FCV requerirá la reducción del coste del hidrógeno para que los FCV puedan competir con alternativas, y a su vez, la reducción de los costes de los FCV depende en gran medida de la operación técnica de la infraestructura de reabastecimiento de combustible [13]. La transición a una movilidad basada en el hidrógeno requiere el desarrollo de una

infraestructura que deba ser capaz de satisfacer la demanda de hidrógeno. A corto y medio plazo, la falta de infraestructura de distribución de hidrógeno puede superarse mediante la producción de hidrógeno in situ. Sin embargo, los costes de las plantas de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno son actualmente demasiado elevados y, en consecuencia, el coste nivelado del hidrógeno (LCOH) es elevado sobre todo si se produce a partir de fuentes renovables [14].

El desarrollo del sistema de vehículos se puede clasificar en tres grupos, vehículos con motor de combustión interna (ICEV), vehículos eléctricos híbridos (HEV) y vehículos totalmente eléctricos (AEV) [5].

1. Vehículo con motor de combustión interna (ICEV): Los vehículos con motor de combustión interna utilizan una cámara de combustión para convertir la energía química del combustible fósil en energía cinética para hacer funcionar al vehículo [5].
2. Vehículo eléctrico híbrido (HEV): incorporan dos motores de distinta naturaleza, un motor eléctrico y otro de combustión, de forma que hacen funcionar el vehículo juntos de manera eficiente en cuanto a combustible [5].
3. Vehículo eléctrico (AEV): Todos los vehículos eléctricos o AEV son vehículos que utilizan únicamente energía eléctrica para la propulsión del vehículo. Según la fuente de energía seleccionada, los AEV se pueden clasificar en tres tipos: vehículos eléctricos de batería (BEV), vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) y vehículos eléctricos híbridos de pila de combustible (FCHEV). La configuración del tren motriz de BEV y FCEV es similar, mientras que el tren motriz FCHEV es el resultado de la hibridación de batería y celda de combustible. Además, los BEV usan solo sistemas de almacenamiento de energía y los FCEV usan solo celdas de combustible, mientras que los FCHEV usan una combinación de celda de combustible y sistema de almacenamiento de energía para impulsar el vehículo [5].

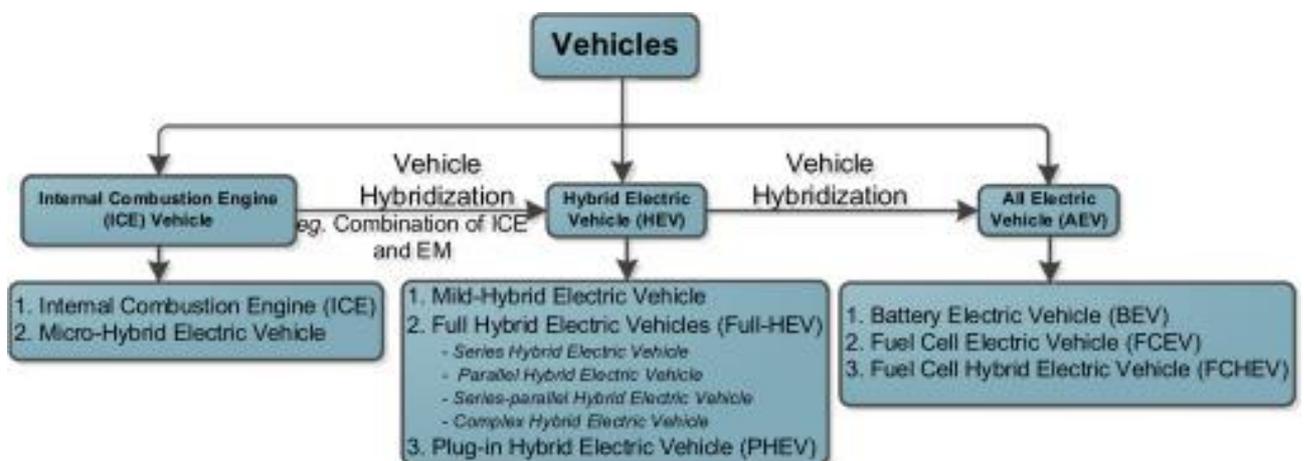


Figura 10: Clasificación de vehículos [5]

En las siguientes figuras se muestran los esquemas de diferentes tipos de vehículos con sus componentes principales:

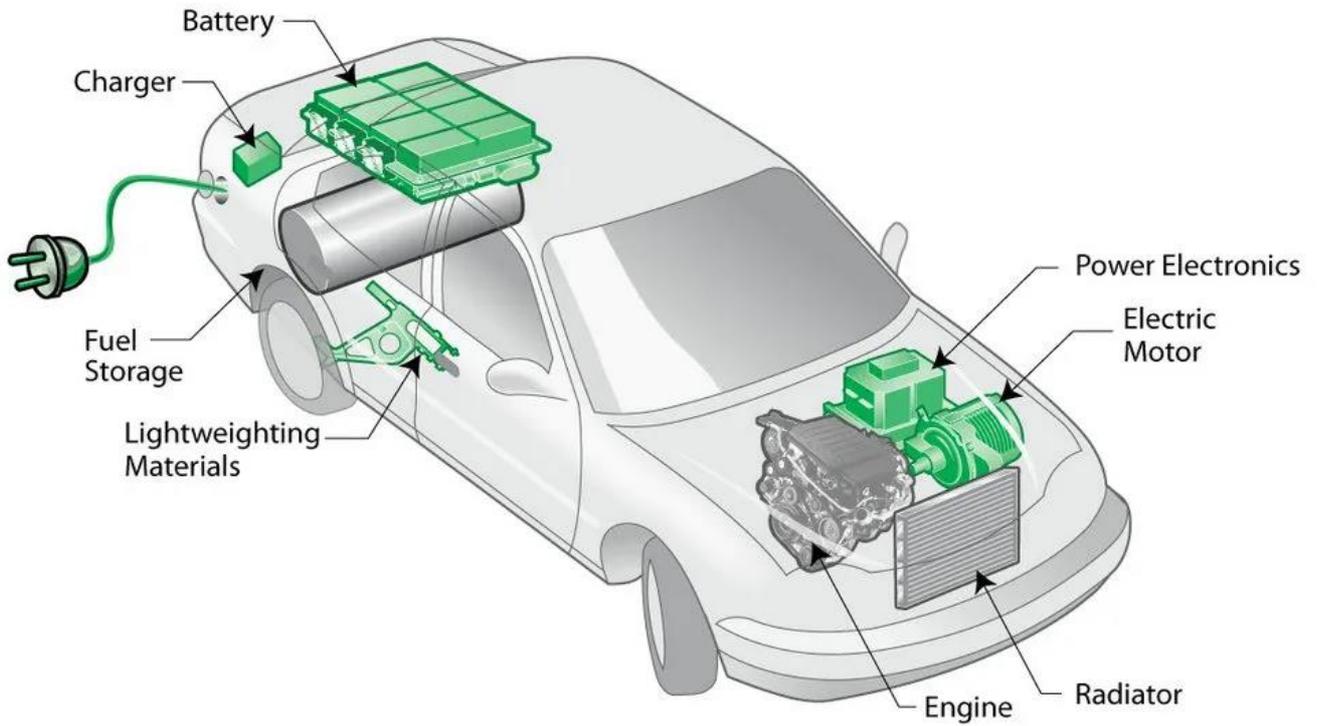


Figura 11: Componentes HEV

TYPES OF ELECTRIC VEHICLES

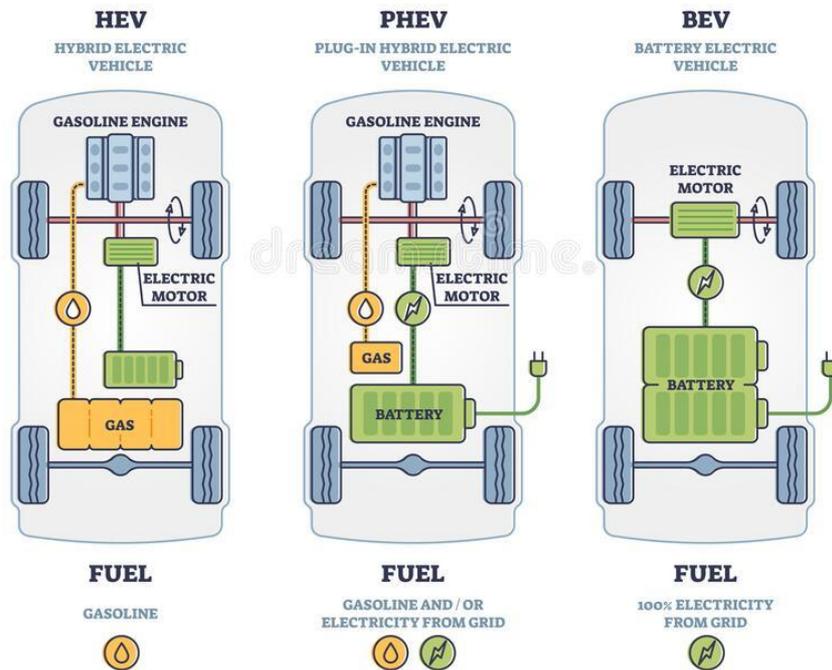


Figura 12: Esquema EV

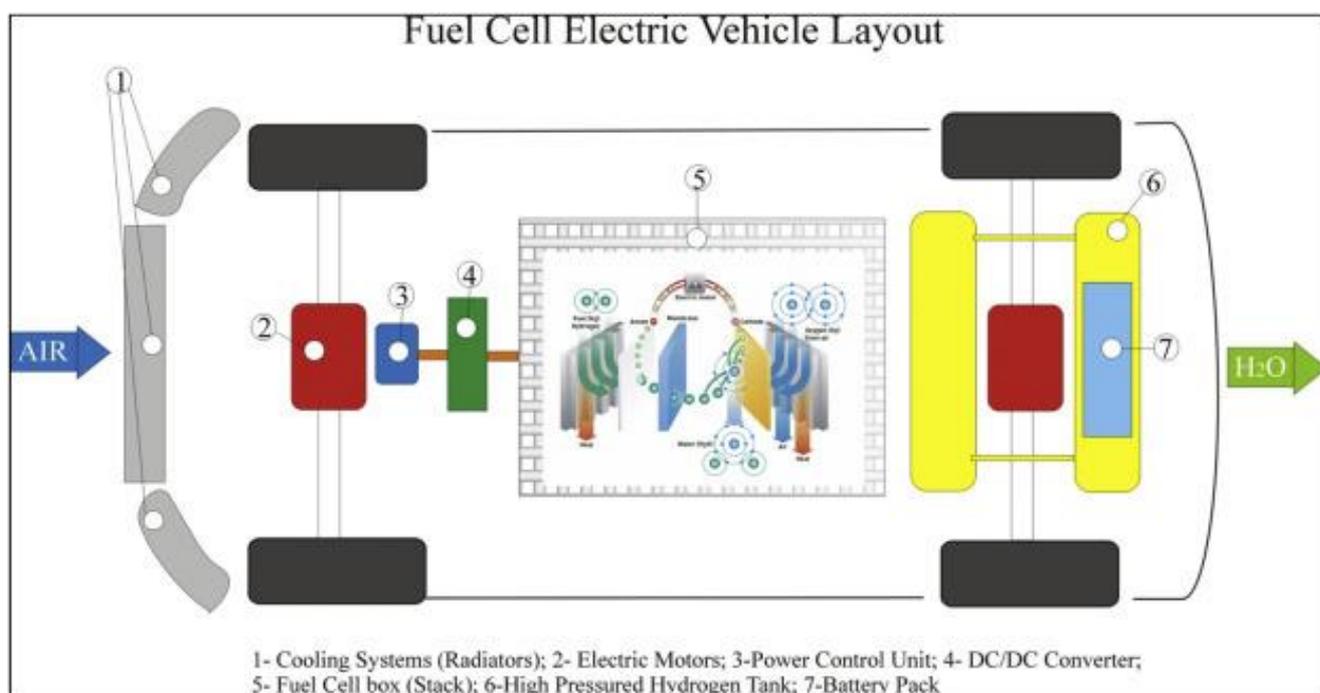


Figura 13: Componentes FCEV

1.2.1 Tipos de vehículos de hidrógeno

Las principales ventajas del Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) son las siguientes: cero emisiones, ya que solo emite agua y calor, (aunque en este aspecto habría que tener en cuenta la procedencia del hidrógeno, ya que puede producir emisiones en su producción, excepto que la producción sea a partir de fuentes renovables, en este caso el hidrógeno es conocido como hidrógeno verde); abastecimiento de combustible rápido; conducción silenciosa; mejor economía y eficiencia de combustible; y fácil mantenimiento. Sin embargo, este tipo de vehículos también presenta una serie de desventajas, como pueden ser: autonomía limitada; estaciones de servicio de hidrógeno insuficientes; desafíos de almacenamiento y seguridad; precios elevados; y poco reconocimiento y popularidad [6].

Los principales componentes del tren motriz en un vehículo eléctrico de celda de combustible son: pila de combustible, que como se ha comentado anteriormente, el tipo de pila de combustible de baja temperatura y presión para los vehículos de hidrógeno más utilizadas son las tipo PEMFC, ya que muestran una alta densidad de potencia, una temperatura de funcionamiento más baja (60-80°C) y una baja corrosión en comparación con otro tipo de pila de combustible; el sistema de suministro de hidrógeno a alta presión; el sistema de suministro de aire; el sistema de humidificación; el sistema de enfriamiento de la pila de combustible; la batería de almacenamiento; el motor de tracción y transmisión; y el módulo de control [6]. La electricidad generada en la pila de combustible se destina a la batería, que es la encargada de repartir la energía al motor o a los motores eléctricos de los que disponga el coche, también se puede destinar electricidad bajo demanda directamente de la

pila de combustible a los motores eléctricos. El sobrante de electricidad acumulado en la batería más la recuperación de energía conseguida a través de la frenada regenerativa se guardan en la batería [15]. En definitiva, las baterías de los vehículos tienen especial importancia en aspectos como son el arranque y el freno regenerativo.



Figura 14: Batería de vehículo FCEV

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que funciona mediante un proceso de conversión de la energía química del combustible, en energía eléctrica. Los reactivos de entrada (combustible y oxidante), alimentan a una celda donde la reacción tiene lugar en presencia de un electrolito, y se genera electricidad y agua. Es un sistema de cero emisiones porque no emite ningún gas de escape y solo produce agua y calor de las reacciones.

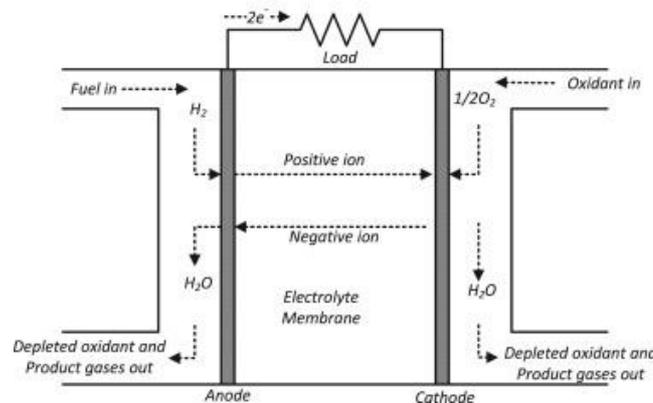


Figura 15: Diagrama de la pila de combustible

Existe una modificación del sistema de propulsión del FCEV que da lugar a una nueva configuración del vehículo de hidrógeno, denominada FCHEV, este tipo de vehículos adopta otro ESS auxiliar para soportar la

pila de combustible. La batería o el ultracondensador se pueden usar como ESS, ya que se pueden cargar y descargar en función de la demanda y el suministro de energía [5].

1.2.2 Convertidor

En los FCEV, la energía eléctrica se genera a partir de la batería y a partir de la celda de combustible, y el objetivo principal de los FCEV es convertir la energía eléctrica de las celdas de combustible en energía utilizable para el motor del vehículo de uso eficiente. Para aplicaciones de accionamiento de motor y alto voltaje, el bajo voltaje se aumenta a 300 V mediante un convertidor CC-CC elevador. El controlador de tracción está adaptado para mantener la velocidad requerida del vehículo variando la amplitud y la frecuencia de la salida del inversor. En el sistema eléctrico del FCEV, el convertidor de potencia CC-CC bidireccional juega un papel clave para controlar el flujo de energía desde la celda de combustible hasta el motor de tracción, y desde el motor hasta la batería en el modo de frenado regenerativo. El convertidor de potencia DC-DC bidireccional controla el flujo de energía con la ayuda de controladores de tracción y voltaje. [16]

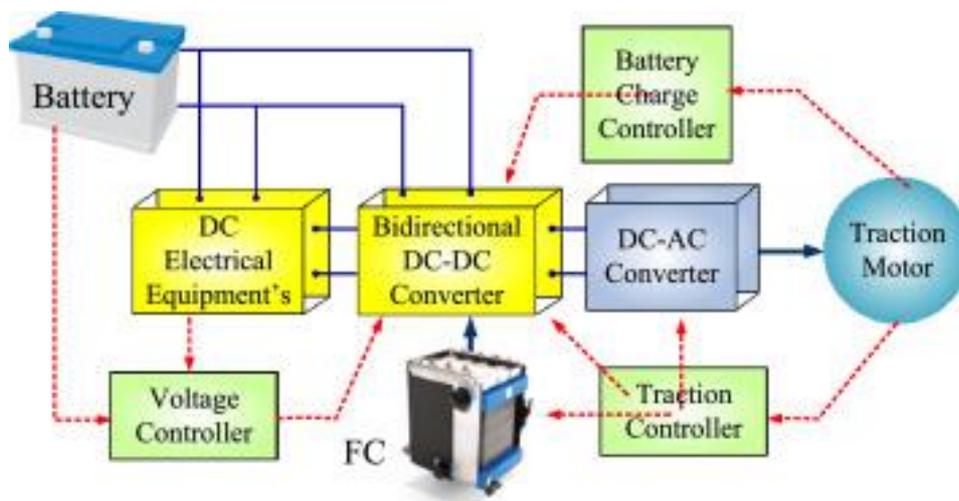


Figura 16: Esquema de control de FCEV [16]

1.2.3 Freno regenerativo

La autonomía es un aspecto fundamental en cualquier vehículo, es la distancia máxima que este puede lograr con una sola recarga, lo que hace indispensable el desarrollo de sistemas que permitan recargar las baterías con el vehículo en movimiento, sin depender totalmente de los puntos de recarga.

En la actualidad, los modelos de los sistemas de regeneración de energía en los vehículos están enfocados al empleo del FR (Freno regenerativo). Este sistema convierte la energía cinética del motor durante el proceso de frenado en energía eléctrica. La energía eléctrica convertida por el FR es normalmente utilizada para cargar una batería, empleando el mismo principio del alternador [17].

El funcionamiento del FR consiste en la utilización del motor para reducir la velocidad del automóvil al aplicar fuerza al pedal del freno. En este instante, el motor eléctrico funciona en dirección inversa, lo que reduce la velocidad del automóvil. Cuando el motor cambia de sentido de giro, empieza a actuar como generador (a), produciendo energía que puede emplearse en sistemas eléctricos, como la recarga de batería. Por el contrario, cuando el vehículo está en condiciones de aceleración el motor gira en el otro sentido tomando energía de la batería (b) [17].

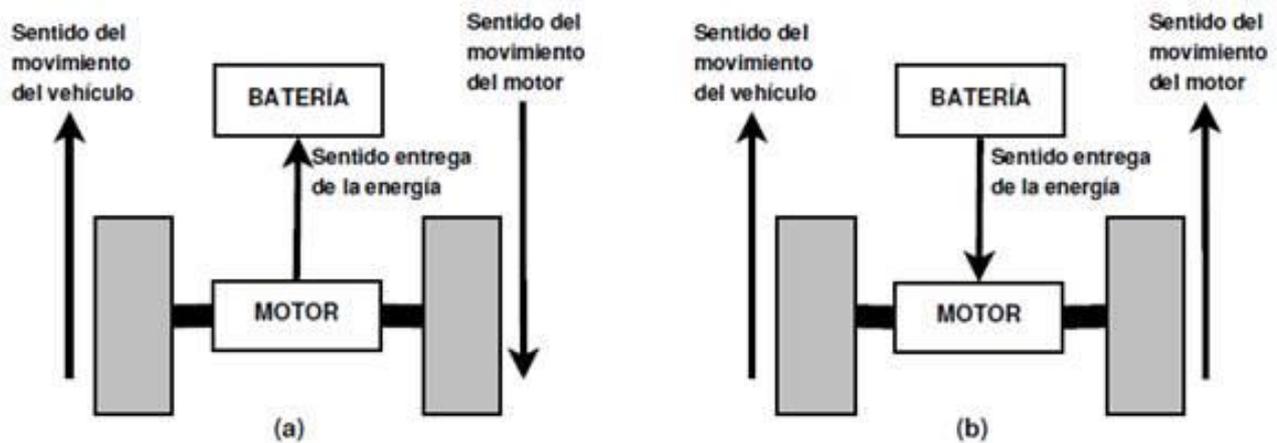


Figura 17: Diagrama del flujo de potencia [17]

1.2.4 Modelos actuales de vehículos de hidrógeno

En este apartado se comentan los vehículos de hidrógeno que hay en el mercado actualmente y otros que estarán próximamente, así como sus principales características:

- Hyundai NEXO:

| Característica | Valor |
|--------------------------|-----------------------|
| Potencia | 135 kW (184 CV) |
| Aceleración | 0 a 100 km/h en 9,5 s |
| Velocidad máxima | 179 km/h |
| Tiempo de recarga | 5 min |
| Autonomía | 666 km |

Tabla 3: Características Hyundai NEXO [18]

Este vehículo está a la venta en España desde el año 2018 a un precio de 72.850€. En este caso, el hidrógeno que genera la electricidad, a través de la pila de combustible, se almacena en tres tanques de 52,2 litros cada uno, ubicados bajo los asientos traseros y el maletero [19].



Figura 18: Hyundai NEXO [20]

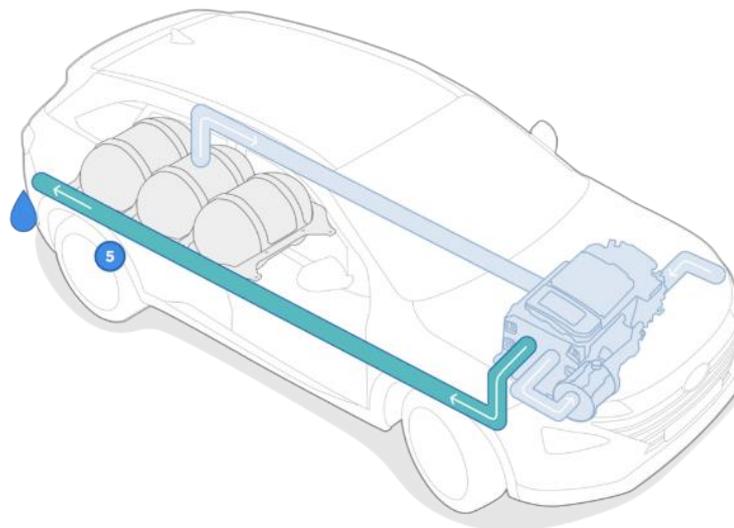


Figura 19: Esquema Hyundai NEXO [20]

- Toyota Mirai:

| Característica | Valor |
|--------------------------|---------------------|
| Potencia | 128 kW (182 CV) |
| Aceleración | 0 a 100 km/h en 9 s |
| Velocidad máxima | 175 km/h |
| Tiempo de recarga | 3 min |
| Autonomía | 650 km |

Tabla 4: Características Toyota Mirai

En noviembre del año 2020, Toyota inició la producción de la segunda generación que presentó en Tokio a finales del año 2019. El modelo, totalmente nuevo, incorpora avances en tecnología, eficiencia, rendimiento y diseño. Un sistema de celda de combustible optimizado y tres tanques de hidrógeno de mayor volumen que permiten un 30% más de autonomía que el modelo anterior, llegando hasta los 650 km. El precio de este vehículo es de 65.000€. El Toyota Mirai ha sido el elegido para ser el primer modelo de taxi impulsado por pila de combustible de hidrógeno en Madrid, que ya cuenta con la autorización del Ayuntamiento para prestar servicio, aunque el verdadero desafío será el repostaje, ya que en Madrid solo existe un surtidor de hidrógeno para automoción [18].



Figura 20: Toyota Mirai

- Honda Clarity Fuel Cell:

La potencia de este vehículo es de 103 kW (174 CV) y 300 Nm de par máximo, debido a que la segunda generación de este modelo consiguió mejorar el tamaño y la capacidad de la pila de combustible en un 30%, su autonomía es de 580 km y el precio es de 55.000€. [18] La mala noticia para este vehículo es que Honda ha decidido cesar su producción tras varios años de comercialización poco exitosa en diversos países del mundo, entre los que no se encuentra España [21].



Figura 21: Honda Clarity Fuel Cell

- BMW i Hydrogen NEXT:

Es un modelo que estará próximamente en el mercado. La marca actualmente está sometiéndolo a pruebas y se espera su presentación durante el año 2022. El vehículo incorpora parte de la tecnología que el grupo ha desarrollado gracias al acuerdo suscrito con Toyota en 2013. La potencia del vehículo es de 275 kW (374 CV), y el sistema incorpora dos tanques de hidrógeno de plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP), la capacidad de cada uno es de 6 kg de hidrógeno, almacenado a 700 bares de presión, y su repostaje requiere entre 3 y 4 minutos [18].



Figura 22: BMW i Hydrogen NEXT

- Hopium Machina:

Hopium es una marca francesa, de creación reciente, dedicada a la fabricación de coches de hidrógeno de lujo. Anunciaron el primer sedán de hidrógeno en octubre del año 2020 y lo han producido en tiempo récord en el taller de pruebas Linas-Montlhéry. El prototipo, un coupé, se llama Alpha 0. El coche de producción, Hopium Machina, ya ha abierto reservas para una de sus primeras 1000 unidades. La potencia de este modelo es de 368 kW (500 CV), con una velocidad máxima de 200 km/h, el tiempo de repostaje es de 3 minutos y su autonomía de 1000 km. El precio del Alpha 0 parte de 120.000€ [18].



Figura 23: Hopium Machina

- Hyperion XP-1:

Este modelo ha sido desarrollado por una start-up californiana y debe comenzar a fabricar las primeras 300 unidades programadas en el año 2022, y promete una autonomía de 1635 km, una velocidad máxima de 356 km/h y una aceleración de 0 a 100 km/h en solo 2,2 segundos [21]. Por ahora no se ha revelado la potencia que es capaz de desempeñar, aunque parece ser que está capacitado para convertirse en el coche eléctrico más rápido del mundo. Actualmente, el récord lo tiene el Genovation GXE al alcanzar los 340,85 km/h [22].

Las cifras de ensueño del Hyperion XP-1 son posibles, en gran parte, gracias al empleo de materiales livianos, como el chasis fabricado en titanio y fibra de carbono, que dejan el peso en vacío en tan solo 1.032 kg. Es decir, aproximadamente la mitad de lo que pesa un Bugatti Chiron [22].



Figura 24: Hyperion XP-1

1.3. Objetivo

Una vez analizada la situación energética actual, caracterizada por el aumento de consumo de la sociedad mundial, la subida de precio de los combustibles tradicionales y el agotamiento de los combustibles fósiles, y una vez estudiado el desarrollo del vehículo de hidrógeno a lo largo de los últimos años, sus principales ventajas e inconvenientes, así como los vehículos que se encuentran a día de hoy en el mercado, a continuación se realiza un estudio del estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno (hidrogeneras). En primer lugar, se describen las estaciones de hidrógeno, sus principales componentes, así como las diferentes tipologías que existen actualmente según diferentes criterios. A continuación, se estudia la situación de las hidrogeneras a nivel

mundial, a nivel europeo, y a nivel español, y por último, se comenta la normativa aplicable a las hidrogeneras, también a nivel mundial, nivel europeo, y nivel español.

2 DESCRIPCIÓN DE UNA HIDROGENERA

En este segundo capítulo se habla de la importancia de las estaciones de servicio de hidrógeno (HRS) para el desarrollo y el éxito de la comercialización de los vehículos de hidrógeno, además, se profundiza en los principales componentes que están presentes en las HRS, y en los diferentes tipos de HRS que existen.

La construcción de infraestructuras de hidrogenación es muy importante para promover el desarrollo a gran escala de la industria de la energía del hidrógeno, además, el rendimiento técnico de la estación de repostaje de hidrógeno (HRS) determina en gran medida la eficiencia de repostaje y el coste de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Por lo tanto, la transición hacia una movilidad basada en el hidrógeno requiere del desarrollo de estaciones de servicio de hidrógeno y una infraestructura que debe ser capaz de satisfacer la demanda de hidrógeno. Las HRS representan alrededor del 70% de los costes totales de la cadena de movilidad del hidrógeno.

Para el hidrógeno, la necesidad de establecer una infraestructura de repostaje suficiente y económica está demostrando ser una barrera mucho más desafiante que para la electricidad o los combustibles líquidos renovables. El valor de un vehículo de hidrógeno para un comprador potencial depende en gran medida de la existencia de una infraestructura de reabastecimiento de combustible, por otro lado, sin una cantidad suficiente de vehículos de hidrógeno y su demanda, la infraestructura de reabastecimiento de combustible no es financieramente viable [11].

La IEA muestra en la siguiente figura los datos de los costes para las estaciones de servicio de hidrógeno, que se representa frente al tamaño de la estación, la IEA estima los costes de inversión de las actuales HRS en el rango de 0,6 a 2 millones de dólares para el hidrógeno a una presión de 700 bar y de 0,15 a 1,6 millones de dólares para el hidrógeno a una presión de 350 bar [11].

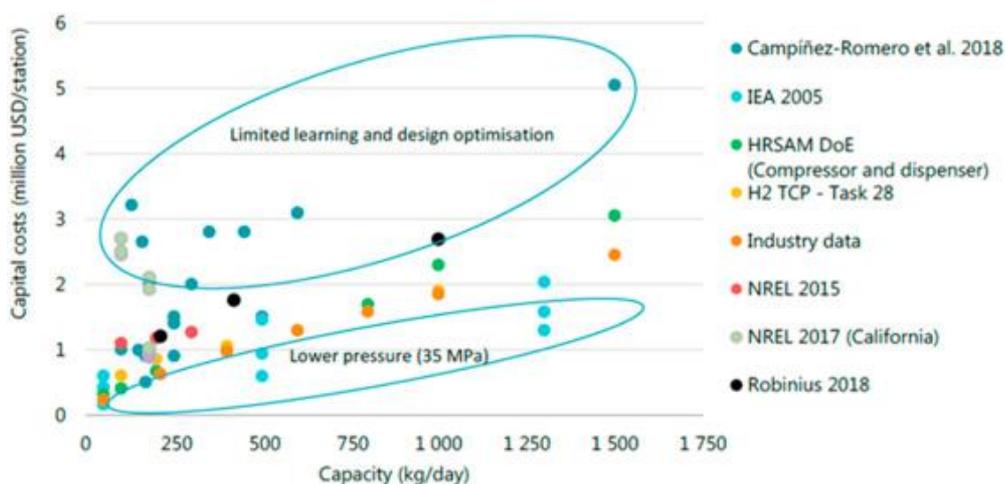


Figura 25: Coste de capital de la HRS en función de la capacidad

2.1. Componentes de una hidrogenera

El esquema de una HRS dependerá de si la producción de hidrógeno se produce in situ (HRS on-site), o bien, si se produce en otro lugar y se transporta hasta la estación (HRS off-site). En la siguiente figura se muestra un esquema simplificado de la configuración de una HRS on-site con producción de hidrógeno mediante electrólisis.

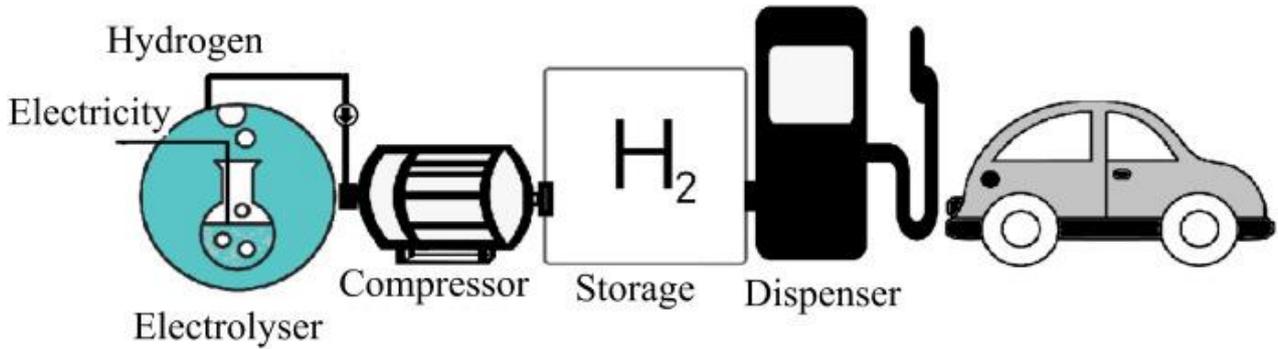


Figura 26: Esquema configuración HRS on-site [3]

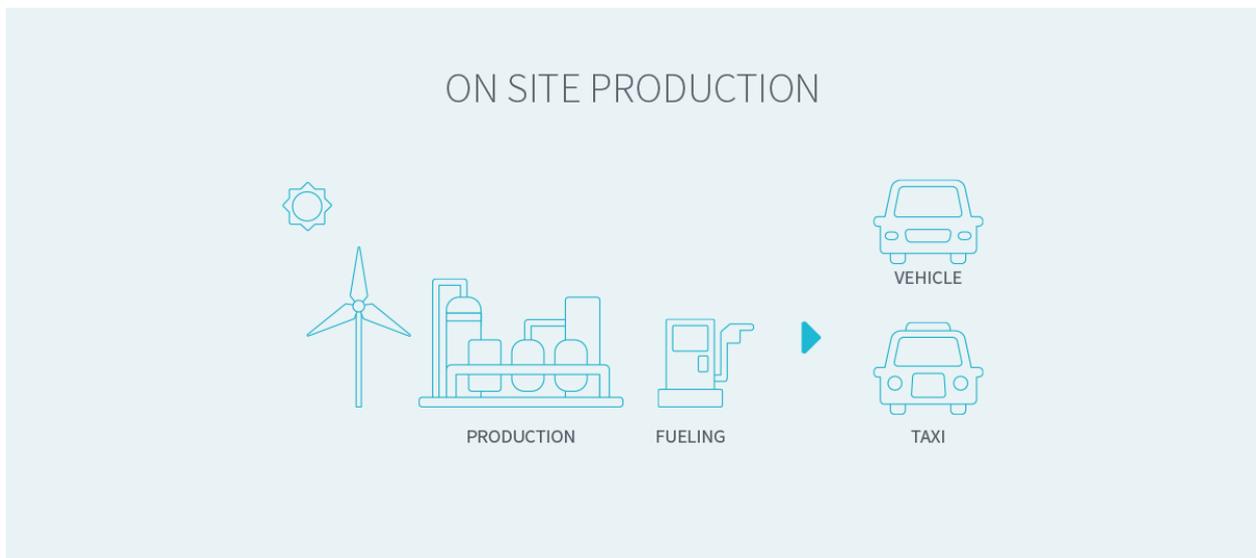


Figura 27: Esquema HRS on-site [23]

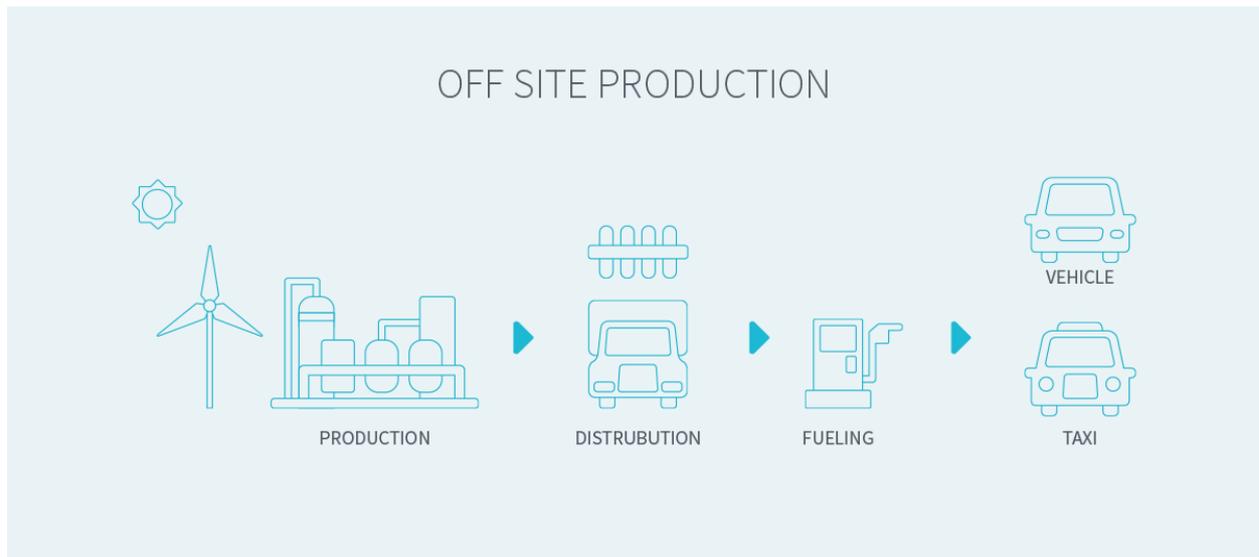


Figura 28: Esquema HRS off-site [23]

Los componentes de una HRS dependen del tipo de estación, aunque algunos de los componentes principales son comunes a todas ellas:

- Estación de hidrógeno gaseoso: la HRS debe disponer de almacenamiento de gas hidrógeno a alta presión, un compresor para llevar la presión del hidrógeno gaseoso entregado por camión o tubería a la presión de suministro del vehículo (350-700 bar), y dispensadores de combustible para los vehículos.
- Estación de hidrógeno líquido: en este caso, es necesario un tanque de almacenamiento criogénico de hidrógeno líquido, una bomba y vaporizador de hidrógeno líquido, un compresor de gas hidrógeno, un tampón de almacenamiento de gas comprimido y dispensadores para los vehículos.
- Estación de hidrógeno producido mediante electrólisis a pequeña escala: la HRS debe disponer de un electrolizador conectado a una fuente de electricidad, almacenamiento de gas hidrógeno, el compresor y dispensadores para los vehículos.
- Estación de hidrógeno producido mediante reformado de metano con vapor a pequeña escala: el sistema de producción de hidrógeno consiste en un pequeño reformador de vapor conectado a una fuente de metano, almacenamiento de gas hidrógeno, que puede ser de baja o de alta presión, compresor y dispensadores [11].

Los componentes que más contribuyen al coste de la HRS son los compresores, el almacenamiento de hidrógeno, y los sistemas de producción (electrolizadores), y los parámetros de rendimiento de los equipos determinan la capacidad general de reabastecimiento de combustible y la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de las HRS [13]. En las siguientes figuras se muestran las posibles configuraciones de equipo del HRS gaseoso y el HRS líquido.

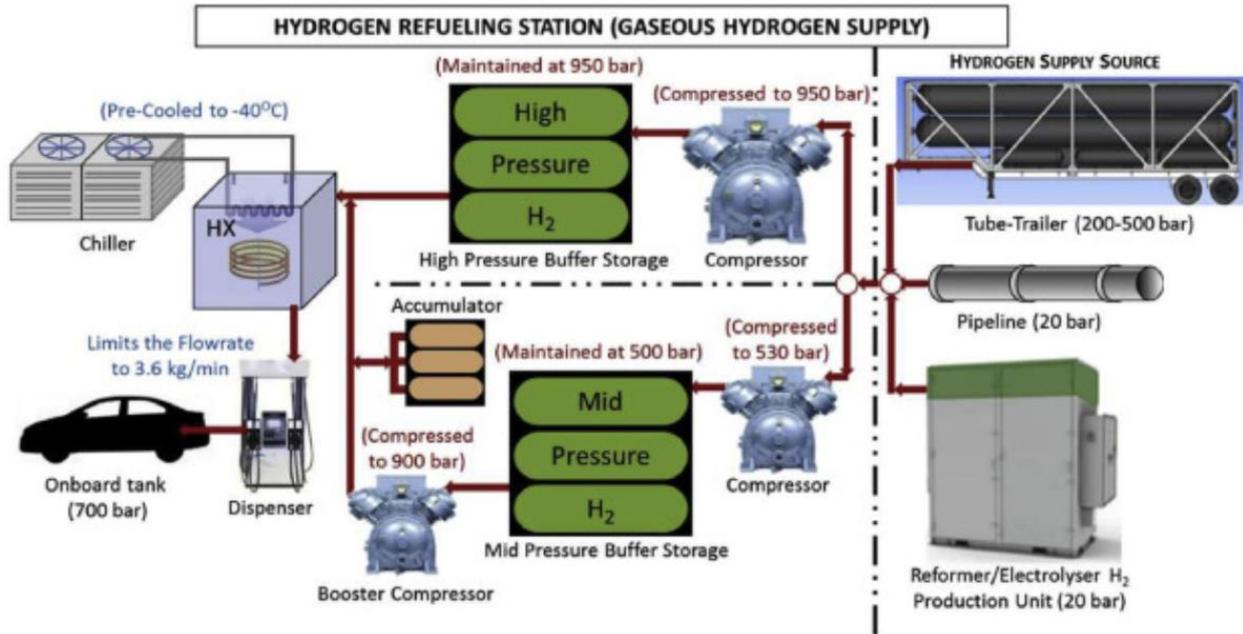


Figura 29: Configuración de equipos HRS gaseoso

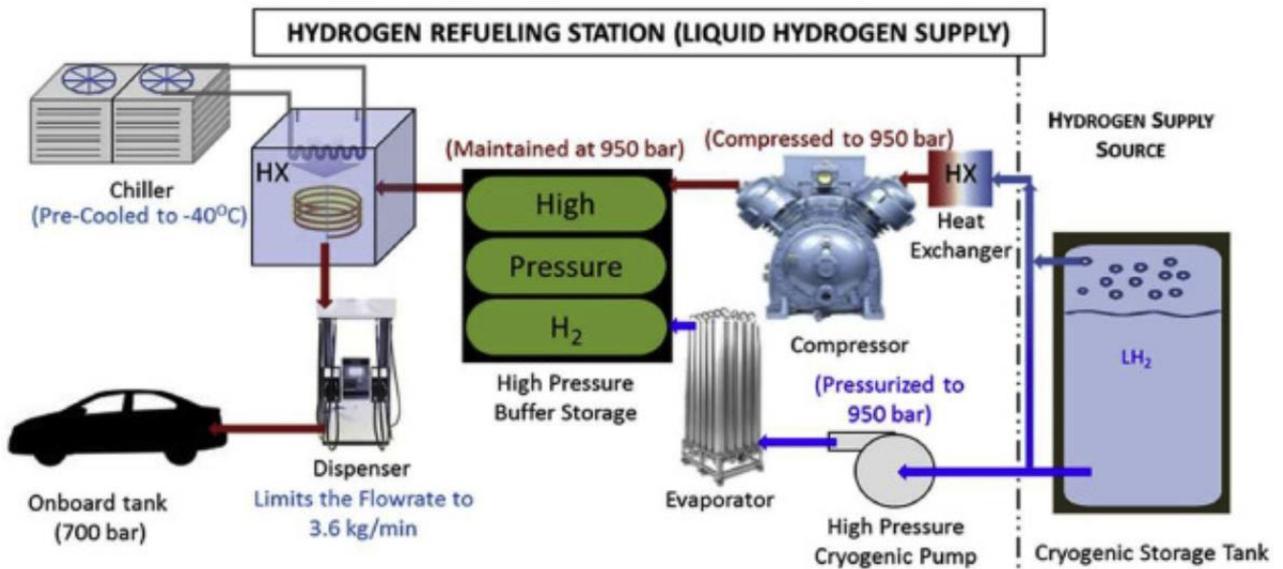


Figura 30: Configuración de equipos HRS líquido

A continuación, se profundiza sobre cada uno de los componentes de la HRS:

- **Compresor:**

El sistema de compresión de hidrógeno es el núcleo de toda la HRS y domina su coste. En la actualidad, las tecnologías de compresión de hidrógeno incluyen principalmente compresión mecánica y compresión no mecánica, siendo los compresores mecánicos los más utilizados. Los compresores mecánicos, a su vez, se dividen principalmente en cuatro categorías: compresores de pistón,

compresores de diafragma, compresores lineales y compresores de líquido iónico [13].

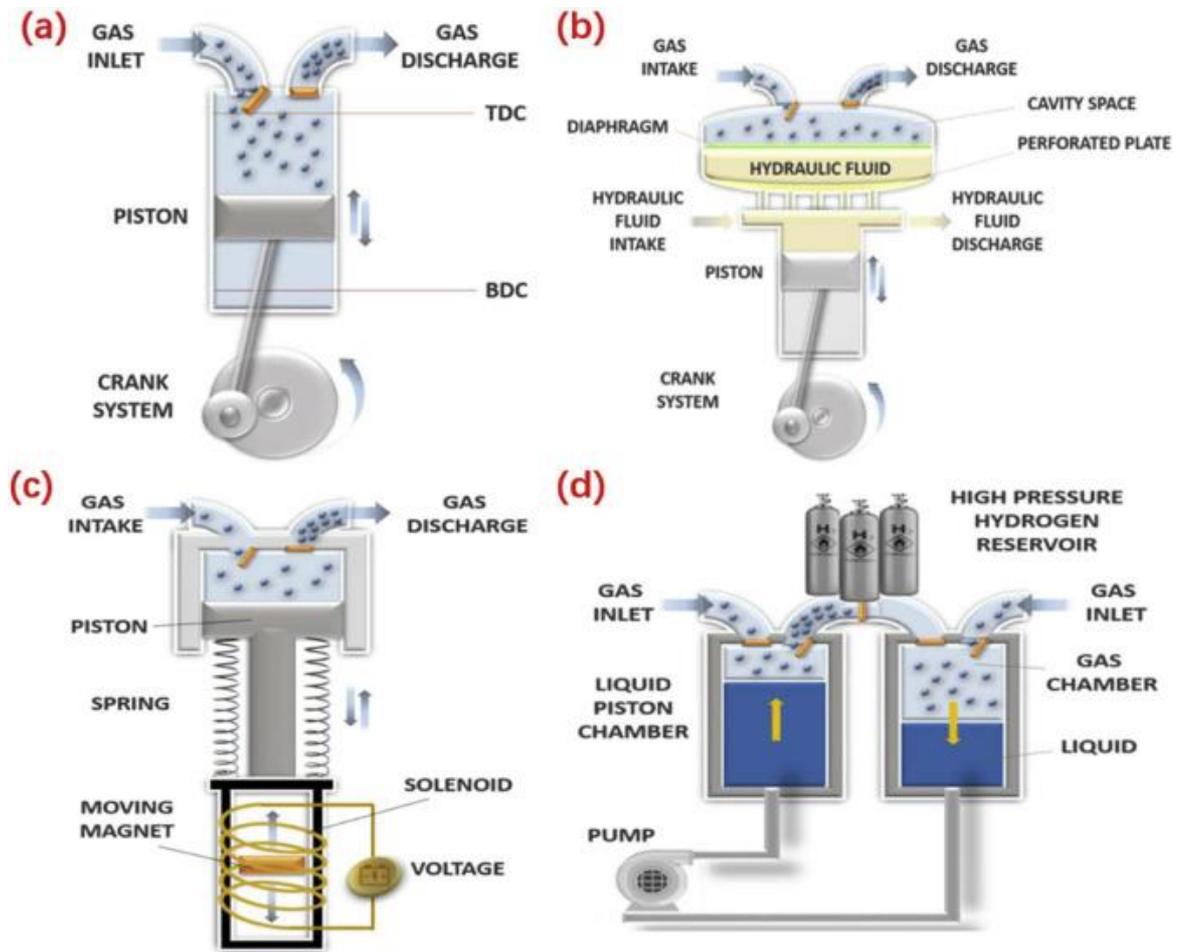


Figura 31: Sección transversal del compresor. (a) compresor de pistón; (b) compresor de diafragma; (c) compresor lineal; (d) compresor de líquido iónico

- Compresor de pistón: utilizan el motor para impulsar el mecanismo de biela manivela, que actúa directamente sobre el pistón en el cilindro para realizar el proceso de succión y escape. Debido al gran caudal del compresor, se suelen utilizar en HRS con una gran capacidad de repostaje diario. En la actualidad, los compresores de pistón cuentan con tecnología madura y de bajo coste, lo que los convierte en la mejor opción para la compresión de hidrógeno a alta presión.
- Compresor de diafragma: es un compresor de desplazamiento positivo de estructura especial. El gas y el aceite hidráulico están aislados, por lo que el gas descargado tiene alta pureza, buena disipación de calor y gran relación de compresión. Es adecuado para subestaciones HRS con poco repostaje diario, debido al pequeño volumen. Este tipo de compresores se suelen utilizar en HRS de demostración.
- Compresor lineal: en comparación con los compresores anteriores, el diseño de todo el sistema es más simple, lo que genera un ahorro de costes significativo. Otra ventaja de este tipo de compresores es que el pistón y el cilindro están separados por un sistema de cojinetes de gas, lo que permite un

funcionamiento sin aceite, mayor eficiencia y tamaños físicos más pequeños. Hoy en día, los compresores lineales se utilizan especialmente para aplicaciones criogénicas que involucran hidrógeno y helio, refrigeración electrónica y refrigeración doméstica.

- Compresor de líquido iónico: utilizan columnas de líquido iónico para comprimir el gas natural e hidrógeno. En comparación con los compresores de pistón, el consumo de energía se puede reducir en aproximadamente un 20% y no se requiere un intercambiador de calor adicional. Además, los compresores de líquido iónico tienen menos componentes móviles y una vida útil más larga, pero tienen un coste más alto, un periodo de entrega más largo, un mayor consumo de energía y una tecnología inmadura [13].

- **Tanque de almacenamiento de hidrógeno:**

Los diferentes métodos de almacenamiento pueden dividirse en dos grandes grupos: almacenamiento físico (hidrógeno comprimido, hidrógeno criocomprimido e hidrógeno líquido) y almacenamiento sólido o mediante materiales (uso de hidruros metálicos u orgánicos, uso de materiales absorbentes o uso de compuestos químicos que contengan hidrógeno), estos últimos, están siendo objeto de gran investigación, pero hoy en día, los más extendidos son los métodos de almacenamiento físico [24].

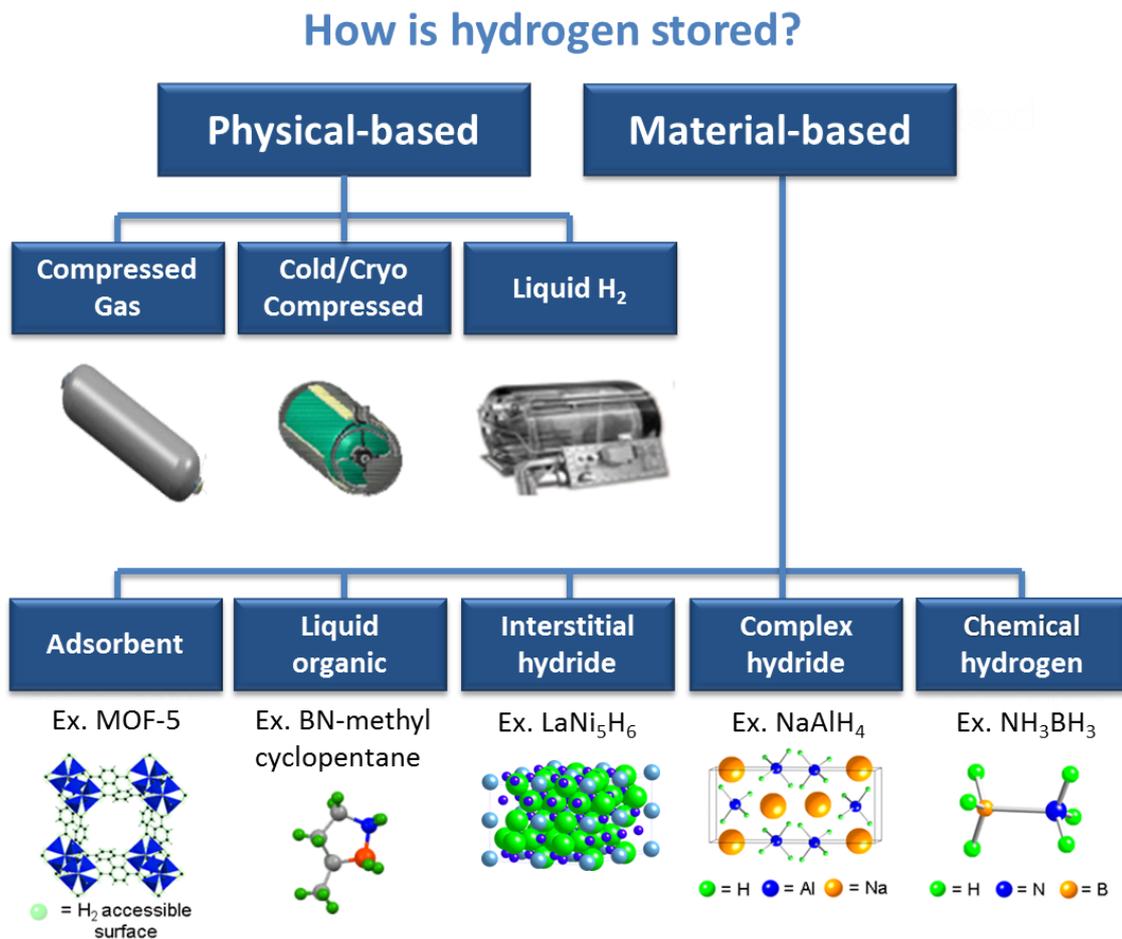


Figura 32: Métodos de almacenamiento de hidrógeno

En la siguiente figura se ven las regiones correspondientes a las tres formas de almacenamiento físico del hidrógeno, así como la variación de su densidad para distintas presiones y temperaturas. El almacenamiento líquido y sobre todo el criocomprimido presentan grandes ventajas, pero se encuentran en una fase experimental, siendo el almacenamiento de hidrógeno comprimido el más empleado actualmente [24].

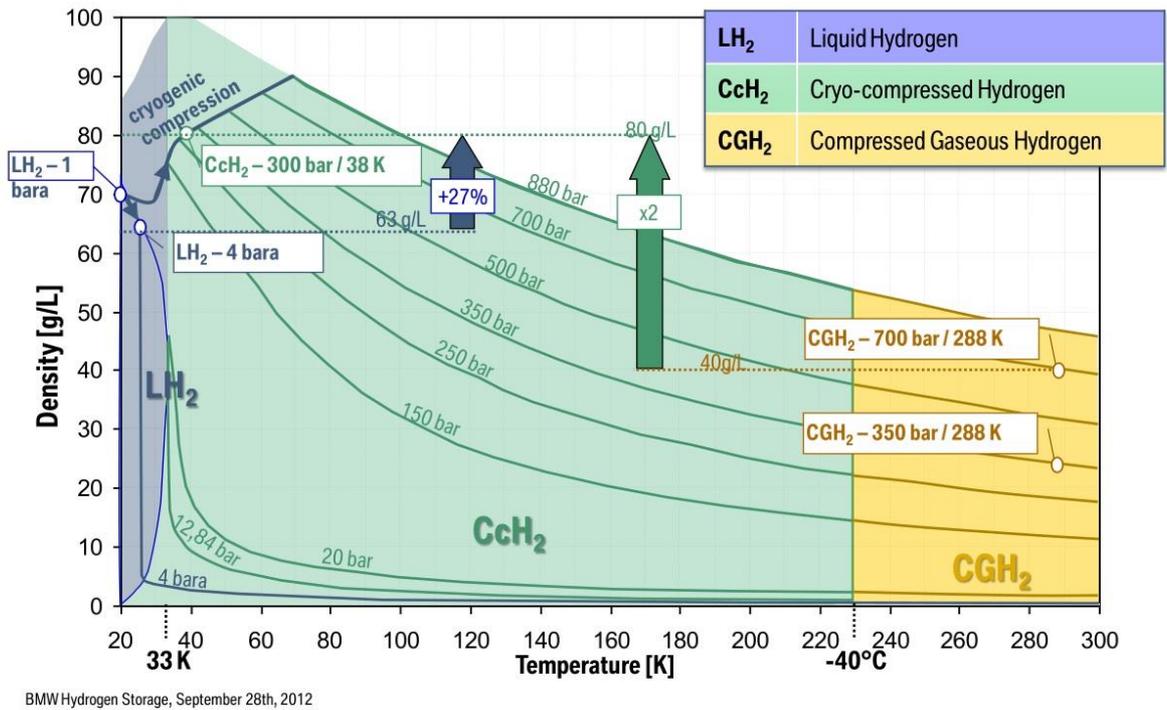


Figura 33: Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno

En los actuales vehículos de pila de combustible de hidrógeno, el hidrógeno se presuriza a 700 bar en tanques especiales, pero en las HRS, el hidrógeno puede encontrarse incluso a 1000 bar. Por ello, las condiciones de los tanques de almacenamiento son muy especiales, tienen que soportar grandes tensiones y un número de ciclos a fatiga por carga y descarga del depósito. Por otro lado, los materiales empleados tienen que ser lo menos susceptible posible a la fragilización por hidrógeno. Debido al pequeño tamaño de las moléculas de hidrógeno, estas son capaces de penetrar a través de distintos materiales lo cual debe tenerse en cuenta para el diseño de los tanques, además, debe tenerse en cuenta los aspectos de seguridad debido a posibles fugas o accidentes. Actualmente, existen cuatro tipos de tanques de almacenamiento y transporte de hidrógeno: [24] En general, los tipos I y II se emplean en aplicaciones estacionarias como laboratorios o hidrogeneras, y los tipos de tanques III y IV, suelen emplearse en vehículos.

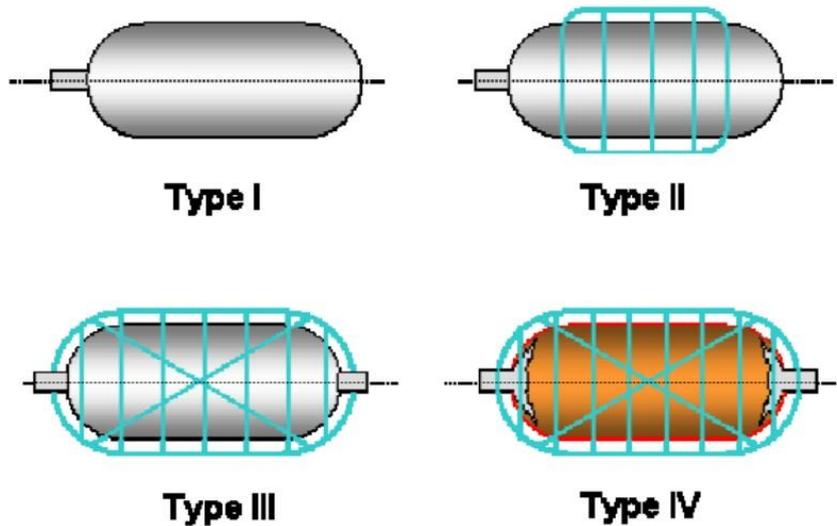


Figura 34: Tipos de depósitos de hidrógeno comprimido

- Tipo I: Son depósitos sin costuras, fabricados con acero o aluminio. Pueden operar a presiones no superiores a 175 bar (aluminio) y 200 bar (acero). Este tipo de depósitos es muy pesado y tiene paredes muy gruesas, lo que provoca que su capacidad gravimétrica sea muy pequeña, en torno al 1%, esto quiere decir que, del peso total del tanque lleno, tan solo un 1% es hidrógeno. Este tipo de tanques son una opción económica para el almacenamiento de hidrógeno en determinadas aplicaciones estacionarias, y son los que se usan en los laboratorios [24].



Figura 35: Depósitos tipo I

- Tipo II: Son tanques metálicos, de acero o aluminio, sin costuras y reforzados con materiales compuestos de fibra de carbono o vidrio en la dirección del aro en la sección cilíndrica del depósito. Este tipo de tanques soportan presiones de 700 bar y hasta 1000 bar. Este tipo de tanques siguen siendo muy pesados, lo que no les hace viables para su uso en automoción, sin embargo, suelen emplearse como depósitos de alta presión en las hidrogeneras [24].



Figura 36: Depósito tipo II

- Tipo III: Constan de un forro metálico interno con o sin costuras a fin de evitar las fugas de hidrógeno por difusión, recubierto todo ello por un material compuesto dispuesto en distintas direcciones. La parte metálica es normalmente de aluminio, aunque también puede ser de acero. Los más resistentes son aquellos que emplean fibra de carbono como material compuesto, siendo capaces de soportar hasta 700 bar. La eliminación de paredes gruesas de materiales metálicos y el mayor uso de materiales compuestos hace que el peso de estos depósitos disminuya en comparación a los de tipo I y II [24].



Figura 37: Depósito tipo III

- Tipo IV: Consta de un forro interno de material plástico, generalmente polietileno de alta densidad, para evitar la difusión del hidrógeno, reforzado mediante fibras de carbono en distintas direcciones que recubren todo el forro de plástico. En la parte más externa puede contar con un recubrimiento de fibra de vidrio a fin de proteger la superficie externa. Estos tanques tipo IV mantienen las válvulas metálicas para poder llevar a cabo la recarga del depósito y el suministro de hidrógeno. En cuanto a la presión máxima que son capaces de soportar, esta se encuentra en torno a unos 700 bar. Al eliminar prácticamente todo el material metálico del depósito, los tipos IV son mucho más ligeros que los tipos I y II. Sin embargo, el forro interno de plástico es peor barrera a la difusión del hidrógeno que los metales. Por otra parte, aunque los depósitos tipo IV son mucho más ligeros que los tipos I y II, también son mucho más caros debido al uso de una gran cantidad de fibra de carbono. Con ellos es posible llegar a alcanzar una densidad gravimétrica de hidrógeno de hasta el 11.3 %, en comparación al 1% del tipo I [24].

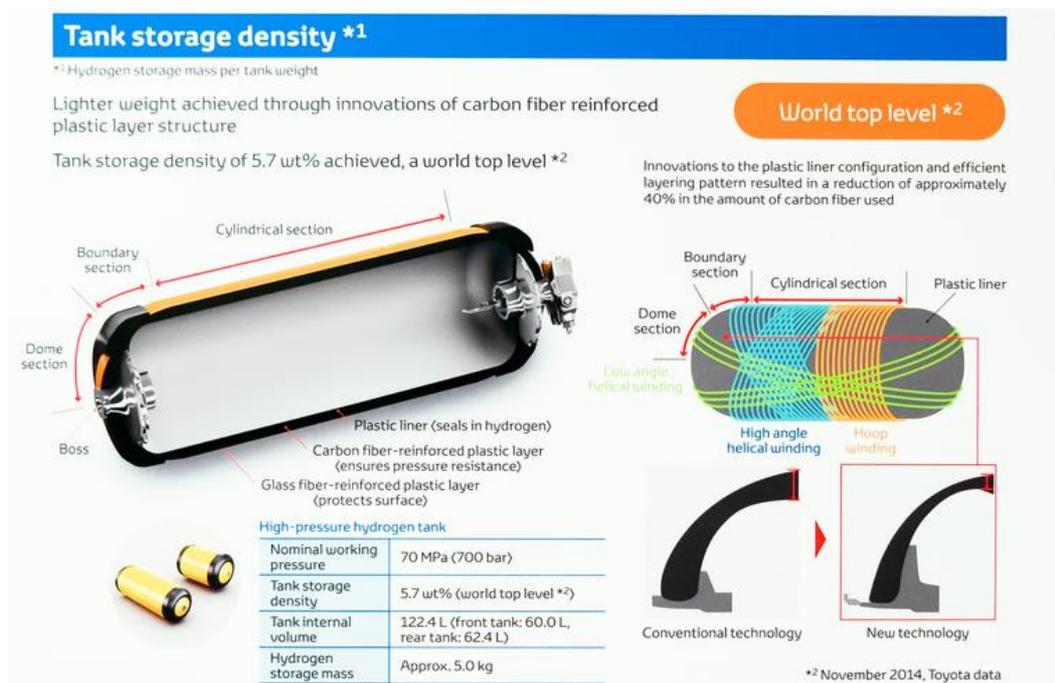


Figura 38: Depósito tipo IV

Es uno de los equipos centrales de las HRS, que determina en gran medida la capacidad de suministro de hidrógeno. Para que los FCV alcancen un kilometraje de 400 km después de una sola carga de hidrógeno, la presión ideal de almacenamiento de hidrógeno a bordo es de 35 a 70 MPa. Los recipientes de almacenamiento de hidrógeno suelen adoptar una presión de almacenamiento de tres etapas de baja presión (20-30 MPa), media presión (30-40 MPa) y alta presión (40-75 MPa). A veces, los remolques

de tubos de hidrógeno (10-20 MPa) también se utilizan como instalaciones de almacenamiento de primera etapa y constituyen un método de almacenamiento de cuatro etapas. Normalmente, la presión de trabajo del recipiente de almacenamiento de hidrógeno en 35 MPa HRS es de 45 MPa, y la presión de trabajo del recipiente de almacenamiento de hidrógeno en 70 MPa HRS es 87,5 MPa.

El reabastecimiento en cascada reduce el consumo de energía de enfriamiento en comparación con el reabastecimiento en una sola etapa, además, existen muchos factores que afectan a este consumo de energía de refrigeración, que está en función del número, presiones iniciales y volúmenes de los tanques de almacenamiento. A medida que aumenta el número de tanques de almacenamiento en cascada, el consumo de energía del sistema disminuye. En el sistema en cascada, los parámetros de los tanques de almacenamiento en cascada son críticos, especialmente la presión y el volumen inicial. Para todas las HRS, la temperatura y la presión dentro del tanque a bordo no debe exceder los 85°C y el 125% de la presión de trabajo normal durante el reabastecimiento de hidrógeno [24].

En la actualidad, existe una fuerte demanda de sistemas de almacenamiento de hidrógeno rentables y eficientes. Los tanques a presión de almacenamiento de hidrógeno normalmente son recipientes de almacenamiento de acero sin costura, y tanques de almacenamiento de alta presión con una estructura de bobinado compuesta.

- **Dispensador:** Para completar rápidamente el proceso de llenado, el equipo del sistema de llenado de hidrógeno incluye tuberías de llenado de alta presión, válvulas de cierre neumáticas, reguladores de presión electrónicos, sensores de temperatura y presión, medidor de flujo, monitor y panel de control. Las funciones necesarias del dispensador incluyen protección contra sobrepresión, compensación de temperatura ambiente, protección contra rotura de manguera y extracción secuencial de gas y funciones para garantizar que el proceso de abastecimiento de combustible pueda interrumpirse automáticamente en circunstancias especiales, como una parada de emergencia. El dispensador debe cumplir con el estándar SAE J2601 reconocido internacionalmente.



Figura 39: Dispensador HRS

- **Unidad de preenfriamiento:**

Los requisitos principales de los conductores de vehículos con pilas de combustible de hidrógeno son un tiempo de llenado de hidrógeno corto y un alto estado final de carga, para ello, es necesario realizar un preenfriamiento de hidrógeno sin exceder el límite de seguridad del material del tanque de almacenamiento. El protocolo SAE J2601 requiere que el hidrógeno se enfríe previamente antes de la distribución, para limitar la temperatura por debajo de su valor máximo (85°C) durante el llenado rápido. La unidad de preenfriamiento utiliza un ciclo de refrigeración térmica, que generalmente consta de un enfriador de hidrógeno, un intercambiador de calor y un sistema de tuberías. El hidrógeno del sistema de almacenamiento ingresa al intercambiador de calor a través de la tubería antes de llegar al dispensador, mientras tanto, el refrigerante ingresa en el intercambiador de calor y se realiza el intercambio de calor entre el hidrógeno y el refrigerante. Después, el hidrógeno regresa al dispensador a través de la tubería y el refrigerante con intercambio de calor regresa al enfriador.

En las siguientes gráficas se muestra, en función de la temperatura ambiente, a que temperatura sería necesario preenfriar el gas antes del proceso de repostaje, así como la presión en cada caso.

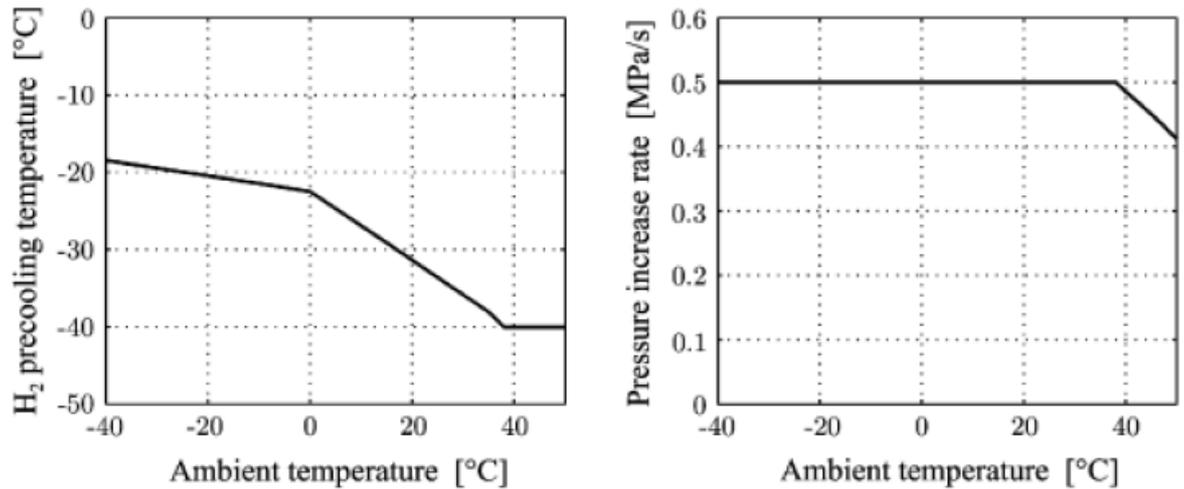


Figura 40: Características de la curva de preenfriamiento y tasa de aumento de presión [25]

El coste de la unidad de preenfriamiento (PCU) representa aproximadamente el 10% del coste total del equipo de la HRS, por ello, es necesario analizar su consumo energético, rendimiento y optimización del diseño para lograr la mayor reducción posible de los costes de HRS [13].

- **Electrolizador:**

Para las HRS equipadas con electrificadores, el hidrógeno generado es presurizado por un compresor y luego almacenado en un tanque de almacenamiento o llenado en el FCV a través del dispensador. La tecnología de electrólisis del agua tiene las ventajas de que es una operación confiable, la tecnología es madura, la producción de hidrógeno es de alta pureza y ausencia de contaminación, pero su consumo de energía es relativamente grande.

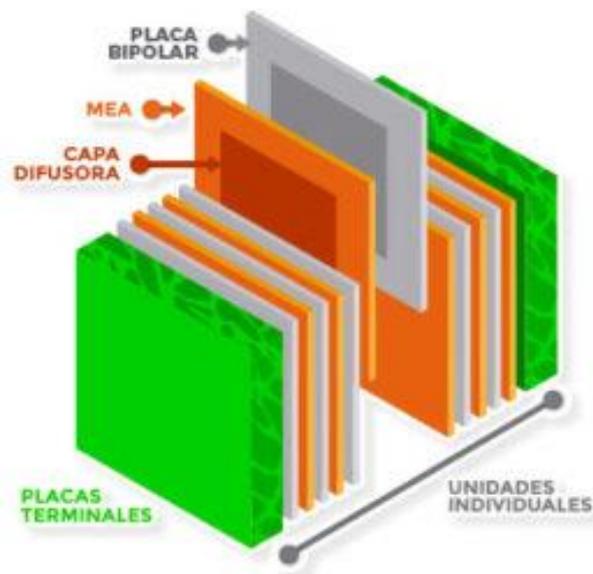


Figura 41: Electrolizador

2.2. Tipologías de HRS

A continuación, se clasifican las estaciones de servicio de hidrógeno desde cuatro perspectivas diferentes, según la ubicación de la producción de hidrógeno, según el estado de almacenamiento de hidrógeno, según la forma de la construcción, y, por último, según el contenido de la construcción.

1. Según la ubicación de producción de hidrógeno:

- **On-Site:** En este caso, la producción de hidrógeno se lleva a cabo en la propia estación para satisfacer la demanda. Este tipo de HRS es adecuado para situaciones en las que las fuentes de hidrógeno externas están alejadas de la estación. Los procesos que suelen usarse para la producción de hidrógeno on-site son la electrólisis de agua y el reformado de metano con vapor.



Figura 42: HRS on-site en Sarreguemines (Francia)

- **Off-Site:** En este caso, la producción de hidrógeno se lleva a cabo fuera de la estación, se suministra desde una unidad de producción central externa a la HRS a través de remolques tubulares, camiones cisterna de hidrógeno líquido o tuberías de hidrógeno, después, el hidrógeno se puede comprimir, almacenar y suministrarlo a los FCV.

2. Según el estado de almacenamiento de hidrógeno:

- **Hidrógeno gaseoso comprimido (CGH):** El hidrógeno se almacena en tanques de almacenamiento de hidrógeno en forma gaseosa y luego se reabastece a los FCV. En este caso, los costes de capital son muy sensibles a la distancia de transporte de hidrógeno, en el caso de transporte de una distancia corta, este tipo de estaciones presentan ventajas, pero en el caso de transporte de una distancia larga, necesitan compresores y tuberías adicionales para comprimir y almacenar hidrógeno gaseoso, por lo que sus costes superarán a las estaciones de hidrógeno líquido.
- **Hidrógeno líquido (LH2):** El hidrógeno se almacena en tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido y se reabastece a los FCV después de la gasificación, este tipo de estaciones tienen mayor densidad volumétrica y una mayor capacidad de almacenamiento. Este tipo de HRS suele ser adecuada cuando la distancia de transporte y el volumen de transporte es elevado. Por otro lado, el hidrógeno líquido tiene pérdidas por evaporación.

3. Según la forma de construcción:

- **HRS estacionaria:** Son las más comunes y no pueden cambiar de situación.
- **HRS móvil:** Estas estaciones tienen mayor flexibilidad, mayor cobertura y radio de servicio, mayor efecto de demostración, y más comodidad para montar y desmontar que las estacionarias. Este tipo de estaciones cooperan con las HRS estacionarias.

4. Según el contenido de la construcción:

- **HRS independiente:** Son estaciones de servicio únicamente de hidrógeno.
- **HRS combinada:** Las más comunes son las estaciones de petróleo e hidrógeno, de gas e hidrógeno y estaciones híbridas de electricidad e hidrógeno, según los tipos de fuentes de energía.

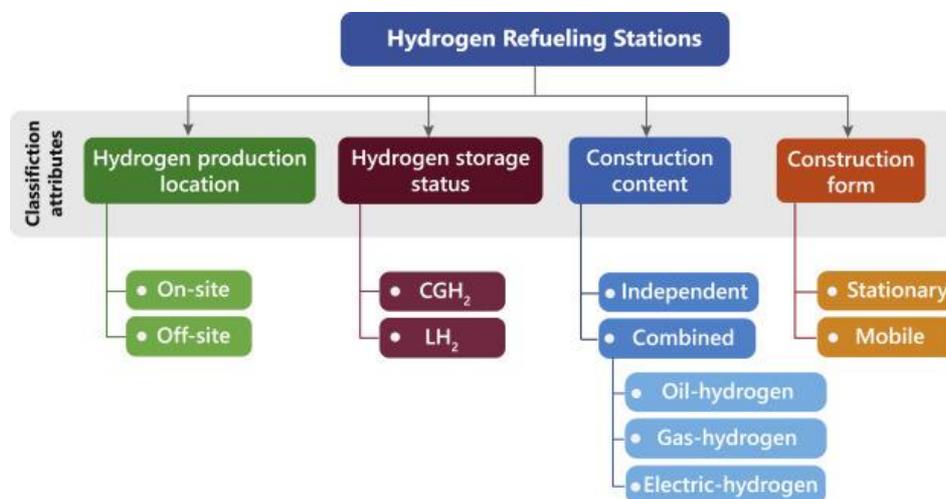


Figura 43: Clasificación HRS

En la siguiente imagen se muestra una hidrogenera de uso público, que utilizará hidrógeno verde generado in situ con energía solar. Tendrá capacidad de producción removable mínima de 60 kg de hidrógeno al día, y será capaz de abastecer a camiones, autobuses, turismos y depósitos y logística para transporte. Está previsto que esta hidrogenera se ponga en funcionamiento a finales del año 2022 [26].



Figura 44: Hidrogenera de uso público en Zaragoza [26]

3 ANÁLISIS DE SITUACIÓN DE LAS HIDROGENERAS

Actualmente, el hidrógeno es reconocido por muchos países del mundo como una opción flexible capaz de crear un nuevo mapa geopolítico global y remodelar la estructura de los mercados energéticos mundiales. Muchos países alrededor del mundo han establecido estrategias nacionales para desarrollar la cadena de valor del hidrógeno [7].

Durante décadas, el principal inconveniente para el desarrollo de vehículos de combustible alternativo ha sido cómo vender vehículos de hidrógeno en ausencia de una infraestructura de repostaje, y cómo atraer inversiones en estaciones de repostaje de hidrógeno sin vehículos de hidrógeno en las carreteras. Según algunos estudios, se ha estimado que el número mínimo de estaciones de hidrógeno para la creación de un mercado masivo es de entre el 15% y el 20% del número de estaciones de gasolina existentes [11].

3.1. Situación mundial

A finales de diciembre del año 2021, se contabilizaban en el mundo un total de 685 estaciones de repostaje de hidrógeno operativas para vehículos, principalmente en América del Norte, Europa, Japón y China. Las estaciones de servicio típicas hoy en día tienen una capacidad de 100-350 kg H₂/día, pero se están desarrollando estaciones más grandes en el rango de 500-1500 kg/día. Teniendo en cuenta que la capacidad de un vehículo de hidrógeno (coche) es de aproximadamente $8 \frac{\text{kg H}_2}{\text{coche}}$, las hidrogeneras actuales pueden abastecer entre 13-44 coches diarios, y en los próximos años, esta cifra podría aumentar hasta 63-188 coches diarios. La mayoría de las estaciones de servicio de hidrógeno en la actualidad son abastecidas por camiones y, muy ocasionalmente, por tuberías que transportan hidrógeno desde una planta de producción de hidrógeno centralizada a gran escala hasta las estaciones de servicio.

El número de estaciones de servicio de hidrógeno en el mundo es un objetivo en movimiento que crece rápidamente y casi todos los países cuentan con el apoyo de subsidios gubernamentales, generalmente del orden del 50% de los costos compartidos. En cuanto a la capacidad de las estaciones, la información de muchas de ellas no está disponible en la base de datos de H2 Tools, sin embargo, las estaciones que dispensan hidrógeno a 70 MPa ó a 35 MPa constituyen la gran mayoría, ya que el estándar internacional para el almacenamiento a bordo de automóviles de pasajeros es de 70 MPa, mientras que los autobuses suelen estar diseñados para almacenar hidrógeno a 35 MPa. Teniendo en cuenta todas las estaciones en la base de datos del PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), el 15,5% suministra a 35 MPa, el 71,1% a 70 MPa, y el 13,4% suministra hidrógeno a cualquier presión [11].

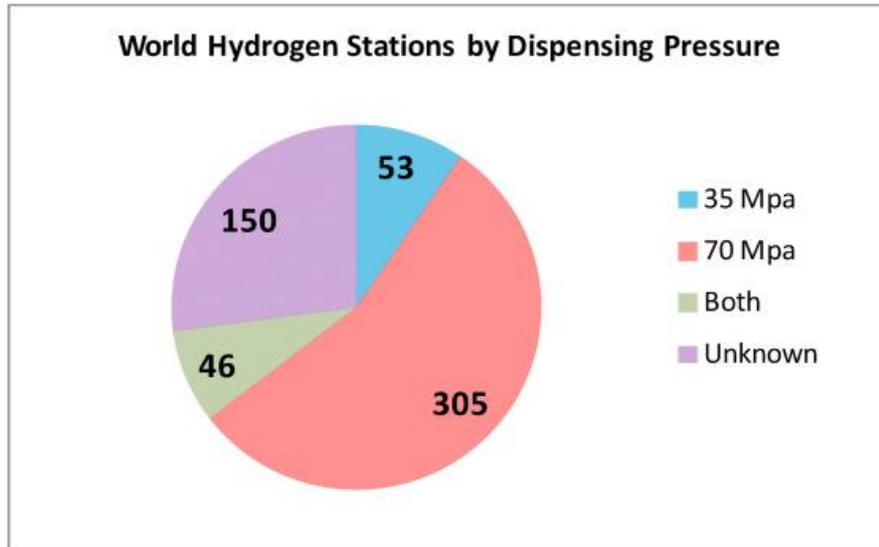


Figura 45: Estaciones de hidrógeno mundiales según la presión de suministro [11]

Los siete países con más hidrogeneras concentran el 82,3% de las estaciones activas. En la siguiente figura se muestra la distribución de estaciones en estos siete países y en el resto del mundo, clasificadas según sean públicas, privadas o planificadas.

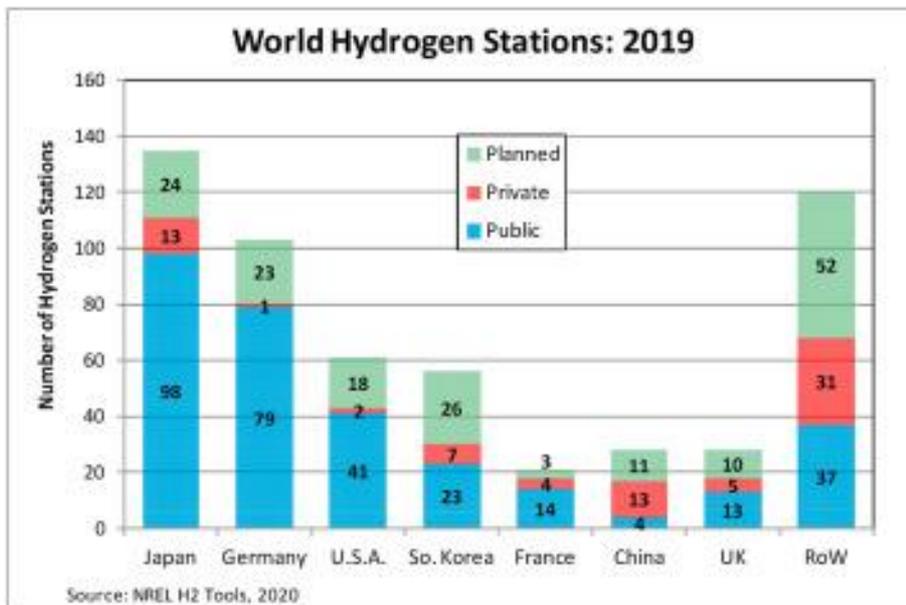


Figura 46: HRS mundiales en el año 2020 [27]

Estados Unidos, con más de 7.500 vehículos de pila de combustible en circulación, ha sido líder en tecnologías de pila de combustible e hidrógeno desde 1969 y pretende mantener este liderazgo ampliando las áreas de aplicación de estas tecnologías. Este compromiso se refleja en una serie de acciones políticas, incluida la publicación de la hoja de ruta para una economía del hidrógeno, que exige utilizar el potencial del hidrógeno

para fortalecer la economía y descarbonizar los sectores del transporte y la industria. Estados Unidos tiene como objetivo entre 2026 y 2030 tener 4.300 estaciones de hidrógeno en todo el país [7].

California ha implementado un plan multifacético para promover las ventas del FCV y el despliegue de las estaciones de servicio. Con respecto a las infraestructuras de hidrógeno, las políticas de apoyo incluyen un estándar de combustible bajos en carbono que otorga a los proveedores de combustibles créditos por hidrógeno bajo en carbono, y el requisito de que al menos el 33% del hidrógeno suministrado para vehículos se produzca a partir de energía renovable. Se incentiva el despliegue de estaciones de servicio mediante ayudas a la construcción y subvenciones a la operación y el mantenimiento. El plan de California para la evolución conjunta de vehículos y estaciones exige: 64 estaciones para 2022, 200 estaciones para 2025, y 1000 estaciones para 2030 [11].

Australia está realizando importantes inversiones en el desarrollo de su industria del hidrógeno, además, este sector se beneficia de abundantes recursos naturales, así como de infraestructuras existentes. El hidrógeno producido a partir de gas natural en Australia es particularmente bajo en impurezas, lo que requiere menos procesamiento posterior para purificarlo, igualmente, el hidrógeno puede beneficiarse de la gran infraestructura de gas natural ya existente, con una red de gasoductos de 17.000 km de longitud para su distribución. En abril de 2021, el gobierno anunció que se invertirían 275,5 millones de dólares en la construcción de la industria del hidrógeno [7].

En China, el desafío para el gobierno es encontrar espacio para la construcción de estaciones de carga de vehículos de hidrógeno, ya que estas deben construirse en centros urbanos, cerca de la población, pero las ciudades chinas están densamente pobladas y hay poco espacio [7]. En este país, tanto los FCV como la infraestructura de hidrógeno están fuertemente subvencionados. En 2019, la mayoría de las estaciones existentes dispensaron a 35 MPa, pero se han establecido nuevos estándares para permitir la dispensación a 25, 35, 50 y 70 MPa [11].

India fue uno de los primeros países en adoptar iniciativas de hidrógeno, estableciendo una hoja de ruta de hidrógeno en 2006, pero actualmente se está quedando atrás con respecto a otros países como China, Japón, y otros países europeos. Sin embargo, ante la urgente necesidad de reducir su dependencia del petróleo importado y descarbonizar su economía, el gobierno indio está tomando medidas políticas para acelerar el desarrollo de su sector del hidrógeno a mayor escala [7].

En la siguiente figura se muestra la evolución histórica del número total de estaciones de repostaje de hidrógeno desde el año 2017 hasta el 2022.

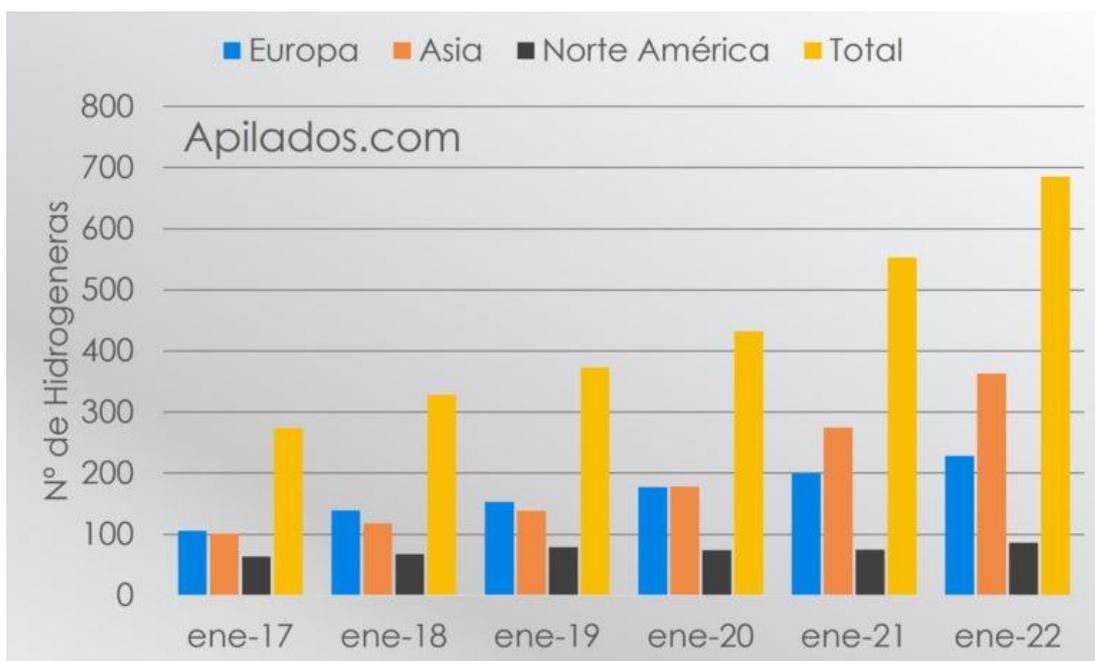


Figura 47: Evolución histórica del número de HRS [28]

Este crecimiento de las HRS no ha sido homogéneo en todo el mundo, la evolución en Norte América ha permanecido prácticamente constante, mientras que en Europa la evolución ha ido siempre en aumento. En Asia, durante el año 2021 han estado en operación casi 90 hidrogeneras, los principales de este crecimiento son Japón, China, y Corea del Sur [28].

3.2. Situación europea

La Unión Europea, al igual que sus países miembros, ha hecho del hidrógeno uno de los pilares de su política energética y climática. Considera este gas como una opción ideal para cumplir sus objetivos para 2050: neutralidad en carbono como lo establece el Acuerdo Climático de París y suministro de energía limpia como lo establece el Pacto Verde Europeo. Para la CE (Comisión Europea), el hidrógeno tiene muchas ventajas: Es la mejor manera para la descarbonización a gran escala de los sectores del transporte, la industria y la construcción. Además, el hidrógeno podría desempeñar un papel importante en la transición hacia las energías renovables al mismo tiempo que garantiza la flexibilidad en la transferencia de energía entre sectores. Además, el hidrógeno ayudaría a reducir la dependencia de la UE de los combustibles fósiles, fortalecería la cadena de valor y ayudaría a crear puestos de trabajo para casi un millón de personas [7].

Entre las numerosas iniciativas llevadas a cabo por la FCH-JU se encuentra el anuncio, en septiembre de 2015, de un gran proyecto para la movilidad del hidrógeno en Europa, el Hydrogen Mobility Europe (H2ME). Este proyecto recibió una financiación de 170 millones de euros, de los que 67 millones procedían de la FCH-JU, y su primera fase finalizó en 2020 con el despliegue de 630 vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno en 10 países y la instalación de 37 nuevas estaciones de recarga de hidrógeno en 8 naciones. En total,

se recorrieron 14,5 millones de kilómetros y se distribuyeron 147 toneladas de hidrógeno a través de 68.000 recargas [7].

El plan nacional de hidrógeno publicado recientemente por Alemania prevé su uso en todo el sector del transporte. La gran mayoría (83) de las 114 estaciones de hidrógeno en funcionamiento en la UE y el Reino Unido están ubicadas en Alemania. El plan inicial es construir 100 estaciones en siete áreas metropolitanas importantes de Alemania, conectadas por estaciones a lo largo de vías arteriales y Autobahn. El plan a largo plazo es instalar 300 estaciones más para finales de 2023 en respuesta al crecimiento en la cantidad de FCV, y una característica clave del plan de despliegue de Alemania es asegurar un precio competitivo para el hidrógeno en comparación con la gasolina. Aunque Alemania es líder en el despliegue de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, en noviembre de 2019 solo había 530 autos con celdas de combustible, 21 autobuses y 2 camiones en operación en el país. Además, el gobierno federal alemán proporciona fondos limitados para la compra de FCV con fines de demostración y está trabajando para garantizar que existan códigos y estándares que sean apropiados para FCV y estaciones de hidrógeno [11]. Alemania, junto con Francia, han sido los principales países que han impulsado el crecimiento europeo de estaciones de servicio de hidrógeno.

En la siguiente figura se muestra la evolución de las HRS en Europa.

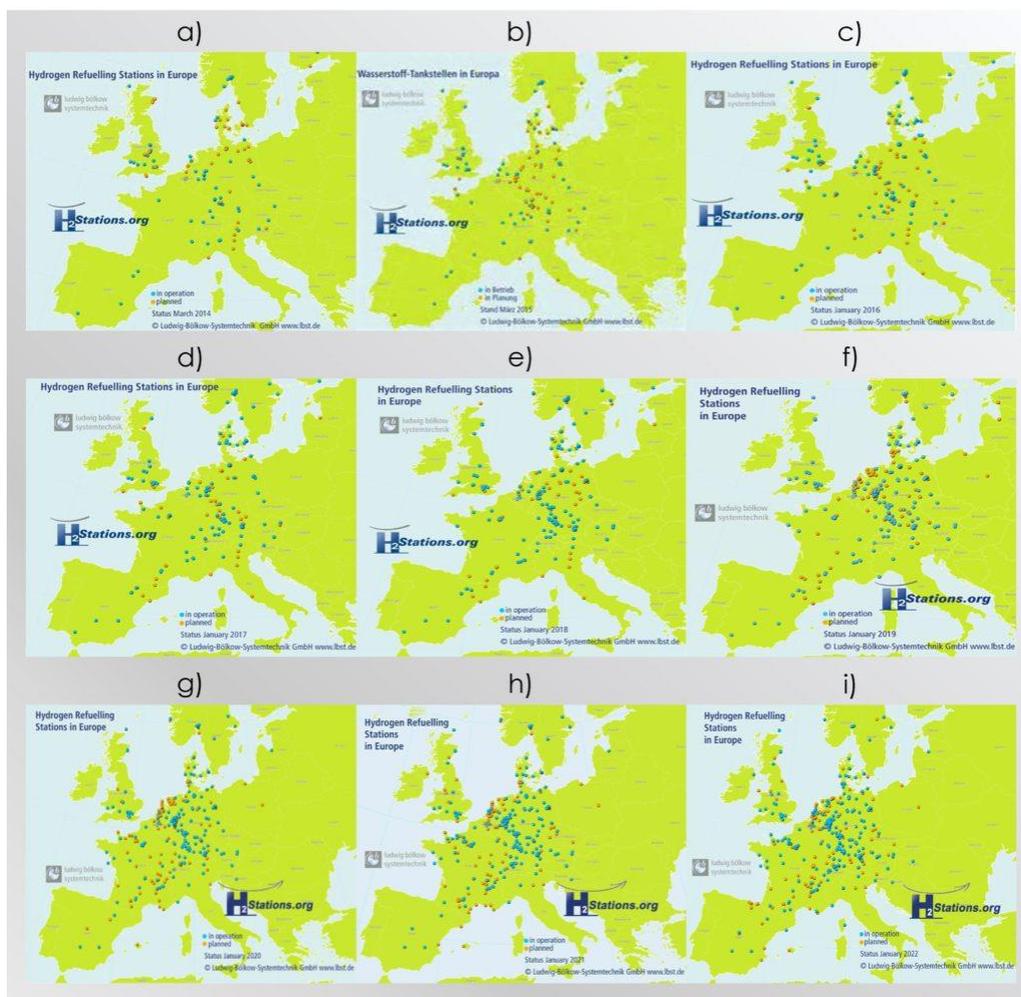


Figura 48: Evolución de las HRS en Europa [29]

3.3. Situación en España

A fecha de mayo de 2022, el número de hidrogeneras en España en operación es de 7 y prácticamente todas tienen un uso privado, en el siguiente mapa se muestra la situación actual, en color verde se muestran las estaciones en operación, en color amarillo las que aún están en fase de Proyecto, y en color gris aquellas de proyectos antiguos. Además, existen varias instituciones que se dedican a la investigación de esta tecnología.

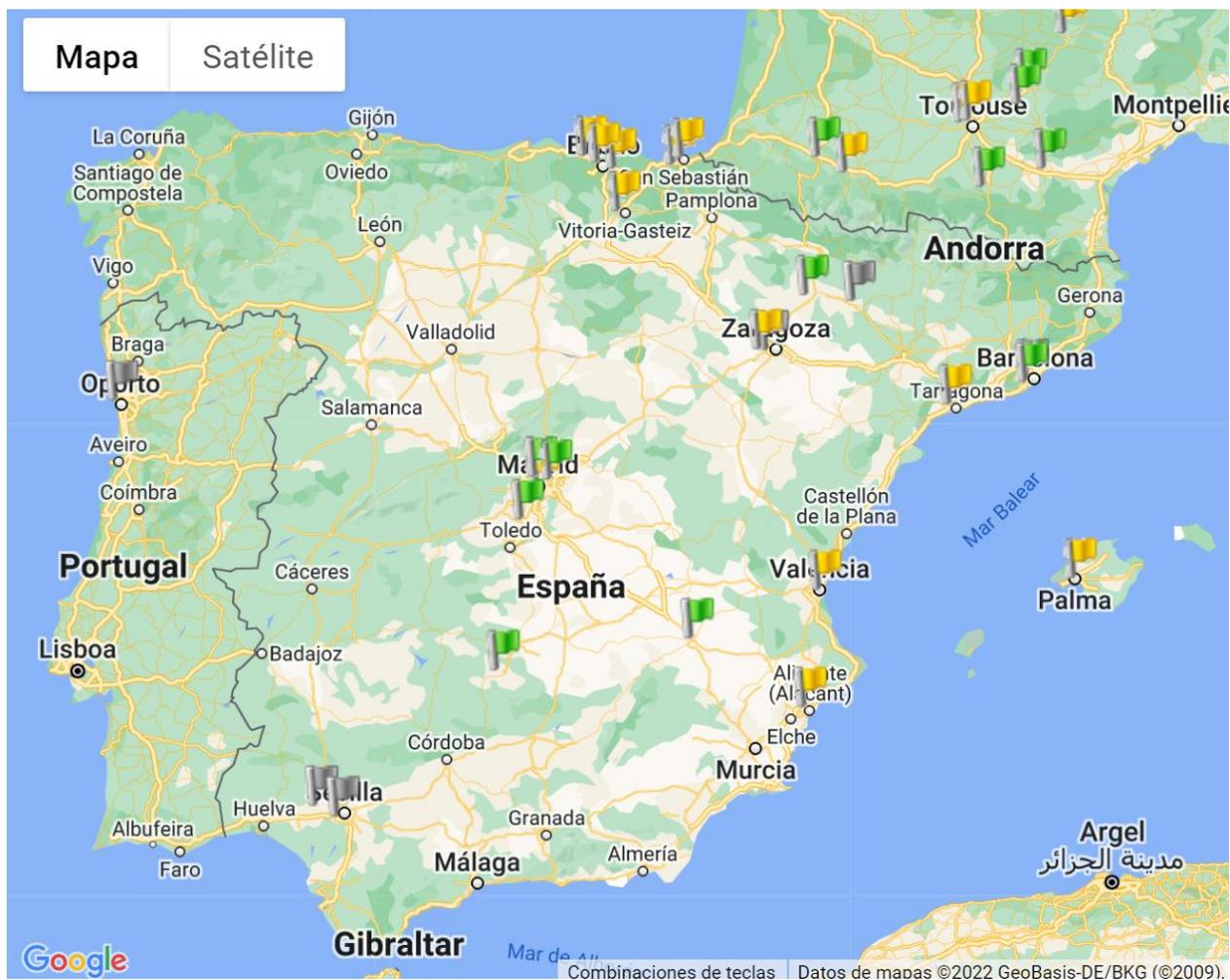


Figura 49: Estaciones de hidrógeno en España (2022) [28]

Existe un plan de expansión de esta tecnología, habiéndose comenzado en 2021 la construcción de 4 estaciones de hidrógeno privadas, y, adicionalmente, durante el año 2022 se iniciarán las obras de las 5 hidrogeneras/hidrolineras públicas con la idea de ir cubriendo la red de puntos de recarga de hidrógeno año a año. Dada la previsión para el año 2024, parece que se van a formar polos concretos en la red de estaciones de repostaje de hidrógeno, siendo el País Vasco y Madrid los principales, seguidos de Barcelona, Zaragoza y la costa del levante [30].

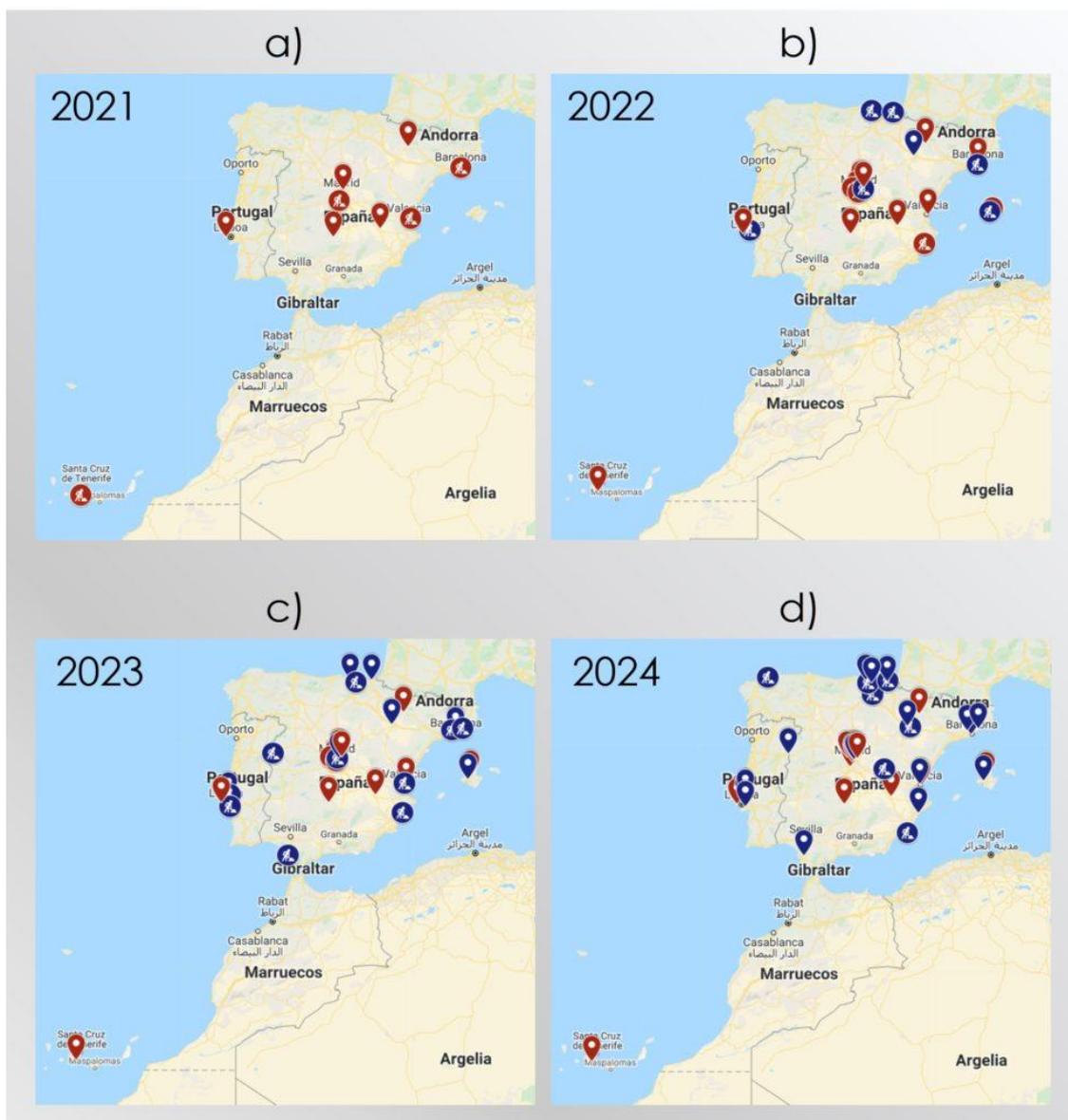


Figura 50: Previsión HRS en España

En la figura anterior, las estaciones privadas están indicadas en color rojo, mientras que las públicas están en color azul. La importante presencia de estaciones públicas puede resultar un incentivo para el uso de vehículos particulares de pila de combustible de hidrógeno.

La red en España todavía es escasa, pero ya han sido presentados proyectos de implantación. En febrero del año 2021, Naturgy presentó un proyecto para la construcción de 38 estaciones de servicio de hidrógeno en todo el territorio nacional y que la compañía estima disponer de ellas antes del año 2025, en la segunda fase, la infraestructura total alcanzará las 120 hidrogeneras [31].

Gasnam (Asociación de Transporte Sostenible que integra la cadena de valor del Gas y el Hidrógeno) y Anfac (Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones) han propuesto una red mínima de estaciones de servicio de hidrógeno, que permita abastecer turismos, autobuses y camiones de largo recorrido, garantizando una distancia máxima de 250 kilómetros entre ellas tal y como establece la Hoja de Ruta del H2. Estas

asociaciones proponen que haya 150 estaciones de suministro de H₂ en 2025 y no en 2030, como propone el Gobierno en su Hoja de Ruta, y así, proponen lo que denominan “un plan de escalada a 2025” que permita construir una infraestructura de suministro mínima con capilaridad a lo largo de todo el territorio nacional [32].

En cuanto a movilidad, para 2030 se estima una flota de al menos 150 autobuses, 5000 vehículos ligeros y pesados, y 2 líneas de trenes comerciales propulsadas con hidrógeno renovable.



Figura 51: HRS futuras España [33]

En la figura anterior se muestra el mapa se algunas hidrogeneras que están realizando algunas empresas energéticas en el país. A continuación, se comentan brevemente cada una de ellas:

- HRS Tenerife: el pasado abril 2022 se inauguró la planta piloto del proyecto europeo SEAFUEL, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Espacio Atlántico. Es la primera hidrogenera en Canarias, y se encuentra en las instalaciones del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER). La llegada de esta instalación tratará de demostrar la viabilidad tecnológica, social y económica de la implantación de combustibles de origen renovables para el transporte en regiones insulares o aisladas, y próximamente se empezará con la última fase del proyecto, que incluye la puesta en servicio de la estación, la producción de hidrógeno verde a partir de energías renovables y agua desalada, y su control y monitorización. La hidrogenera tiene una capacidad de producción de unos 10 kg de hidrógeno al día, y será capaz de producir hidrógeno mediante la

electrólisis del agua procedente de la planta desaladora del ITER haciendo uso de la energía de las instalaciones renovables del instituto. También se expuso parte de la flota SEAFUEL, compuesta hasta el momento por 5 vehículos de hidrógeno: dos Toyota Mirai y un Hyundai Nexso; y 3 vehículos de trabajo, eléctricos modificados, a los que se les ha añadido una pila de combustible para amplificar su autonomía, y serán utilizados en las tareas de mantenimiento del ITER [34].



Figura 52: HRS Tenerife [34]

- HRS La Robla: este proyecto está liderado por Naturgy y Enagás, la idea es construir la mayor planta de producción de hidrógeno verde de España en el terreno de la térmica de La Robla. El proyecto contempla la construcción de una planta fotovoltaica de 400 MW y un electrolizador de hasta 60 MW, para producir hasta 9000 toneladas al año [35].
- HRS Asturias: este proyecto contempla la producción de hidrógeno verde desde un parque eólico marino de 250 MW y otro terrestre de 100 MW para consumo de la industria asturiana y descarbonizar sectores como el del acero y de astilleros. Asimismo, el hidrógeno será distribuido a gran escala a través de la red gasista y exportado a Europa. El proyecto se enmarca en la iniciativa Green Cane, y es promovido por Enagás y Naturgy [36].
- HRS Aragón: este proyecto se desarrollará conjuntamente por Enagás y la compañía energética aragonesa de renovables (CEAR) y contempla el desarrollo de hasta 103 MWe, procedentes de la

hibridación de energía solar y eólica, y 30 MW de electrólisis para la producción de hidrógeno verde [37].

- HRS Mallorca: esta estación se desarrolla dentro del proyecto europeo Green Hysland, que tiene como objetivo desplegar un ecosistema de hidrógeno abarcando toda su cadena de valor en Mallorca, convirtiendo la isla en el primer hub de H₂ en el suroeste de Europa. El proyecto desarrolla las infraestructuras necesarias para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar y su distribución a los usuarios finales, tales como los sectores turísticos, de transporte, industrial y energético de la isla, incluyendo la inyección en la red de gas para la generación de calor y energía verde en la ubicación de su uso final [38].
- HRS Castellón: este proyecto desarrollado por bp, Iberdrola y Enagás, se ubicaría en la refinería de bp en Castellón, donde se construiría un electrolizador de 20 MW, alimentado con energía renovable producida, entre otras fuentes de generación, por una planta fotovoltaica de 40 MW. En fases posteriores, la capacidad de electrólisis podría incrementarse hasta 115 MW, que la convertiría en el mayor proyecto de hidrógeno del sector del refino en España [39].
- HRS Cartagena: este proyecto de producción de hidrógeno renovable a partir de fotoelectrocatalisis que desarrollan Repsol y Enagás en Puertollano, cuenta con el apoyo de la Comisión Europea (CE), que financiará en parte, a través de los fondos europeos Innovation Fund, podría estar en funcionamiento en 2024 [37].

4 NORMATIVA

A la planificación de las HRS le sigue la construcción y el funcionamiento de cada una de ellas, para ello, es necesario la aprobación individual para cada una de ellas de varias autoridades competentes. Las HRS se consideran un tipo novedoso de construcción que involucra materiales peligrosos a los ojos de las agencias gubernamentales y el público en general en casi todos los países y regiones. La falta de códigos y estándares desarrollados específicamente para las estaciones de hidrógeno conduce a un nivel elevado de precaución, y eso se traduce en tiempo y costes de implementación adicionales. Para ello, se están desarrollando códigos y estándares para HRS [11].

El proceso de permisos de HRS involucra una amplia gama de aprobaciones para garantizar una operación segura. Los objetivos básicos incluyen la seguridad del público y del personal, la transparencia con la participación pública, la consistencia y eficiencia del proceso de permisos y la capacidad de aprender de la experiencia. Estas aprobaciones aseguran el cumplimiento de los reglamentos o normas de uso de suelo, impactos ambientales, salud pública, seguridad contra incendios y seguridad de los trabajadores. Las aprobaciones especiales para HRS incluyen el cumplimiento de las normas sobre contaminación por hidrógeno, precisión de recarga y seguridad en la descarga. Desde los componentes del equipo hasta la distribución, el diseño y la ubicación de las estaciones, se han ido estableciendo gradualmente códigos y normas. Algunos son internacionales, como el Código Internacional de Incendios y el Código Internacional de Gas Combustible, y algunos son específicos de un país o incluso de una ciudad para ser compatibles con las políticas e instituciones locales. La Asociación de Energía de Pilas de Combustible e Hidrógeno (FCHEA, por sus siglas en inglés) rastrea y documenta el desarrollo de alrededor de 400 estándares de pilas de combustible e hidrógeno en todo el mundo [11].

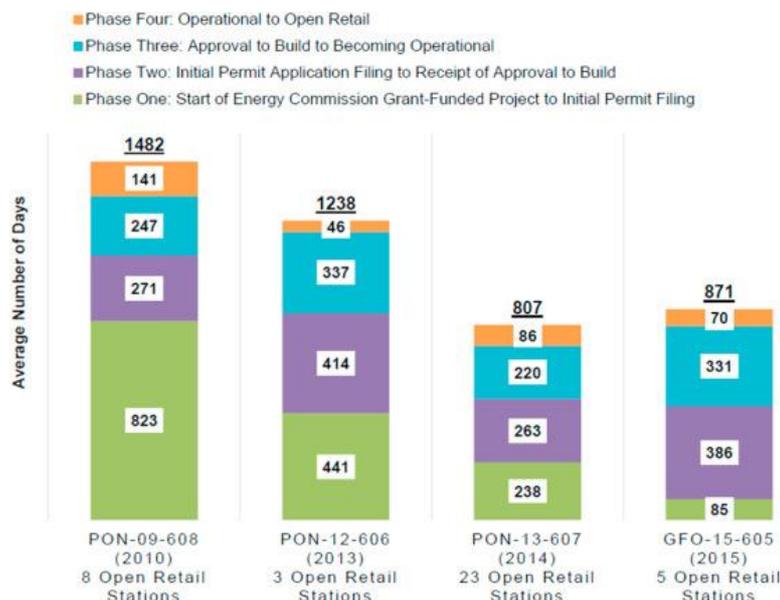


Figura 53: Promedio de días para obtención permisos y desarrollos de las HRS

4.1. Normativa en España

- **RD 379/2001 ITC MIE APQ 5** “Almacenamiento y utilización de botellas y botellones de gas comprimido, licuado y disueltos a presión”: En función de la cantidad y categoría del producto, se definen los equipos contraincendios necesarios, las distancias de seguridad obligatorias entre las zonas de almacenamiento y otros agentes de exposición como las vías públicas. El hidrógeno se encuentra categorizado como sustancia inflamable.
- **RD 2267/2004**: Establece y define los requisitos a satisfacer y condiciones a cumplir por las instalaciones de tipo industrial para prevenir la aparición de incendios y en caso de llegar a producirse, dar una adecuada respuesta limitando así su capacidad de propagación.
- **UNE-EN ISO 4126-1 2004**: Dispositivos de seguridad para la protección contra la presión excesiva. Parte 1: Válvulas de seguridad.
- **UNE 26505:2004**: Vehículos de carretera. Hidrógeno líquido. Interfaz para los sistemas de alimentación en vehículos terrestres.
- **RD 919/2006 ITC-ICG 05**: Distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias.
- **UNE-EN 181001:2010** Tecnologías de hidrógeno. Terminología
- **UNE-EN 61508:2011**: Seguridad funcional sistemas eléctricos, electrónicos y electrónicos programables relacionados con la seguridad.
- **UNE-EN 66305:2011** Protección contra el rayo
- **UNE-EN 60079:2013** Atmósferas explosivas. Parte 14: Diseño, elección y realización de las instalaciones eléctricas.
- **RD 639:2016 (Anexo II)**: Especificaciones técnicas de los puntos de repostaje de hidrógeno.
- **UNE-EN ISO 7751 2017**: Mangueras a base de elastómeros y plásticos y sus conjuntos con accesorios de unión. Relaciones de las presiones de prueba y de reventamiento con la presión máxima de servicio.
- **UNE-EN ISO 11114-4 2017**: Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y de la botella con el gas contenido. Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno.
- **RD 656:2017**: Almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.
- **UNE-EN 17124:2018**: Hidrógeno como combustible. Especificación de producto y aseguramiento de calidad. Aplicaciones que utilizan las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) para vehículos automóviles.

- **UNE-EN 17127:2020:** Puntos de suministro de hidrógeno al aire libre que dispensa hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado. En el apartado 5.3.2 de la norma (Fuelling protocol process), se definen las especificaciones a cumplir durante el repostaje.
- **UNE-EN ISO 17268:2020:** Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres.

4.2. Normativa en Europa

- **UE 2019/1745:** Puntos de recarga para vehículos de motor de categoría L, suministro de electricidad en puerto a los buques de navegación interior, suministro de hidrógeno para el transporte por carretera y suministro de gas natural para el transporte por carretera y por vías navegables.

4.3. Normativa mundial

Los permisos de las HRS en Estados Unidos, especialmente en California, se encuentran entre los más experimentados y estructurados del mundo, y, por lo tanto, brindan una buena referencia para comprender la complejidad, el tiempo y el coste. En Estados Unidos, la selección del sitio de la HRS requiere una revisión de los requisitos de zonificación, el método y la ruta de restricción del transporte de hidrógeno a la HRS, el diseño de la estación y la separación de equipos [11].

- **ISO 13984:1999** Hidrógeno líquido. Interfaz de repostado de vehículos terrestres.
- **ISO 20100:2008** Hidrógeno gas. Estaciones de servicio: Define los requisitos que deben satisfacer las estaciones de hidrógeno, e incluye varios capítulos que hacen referencia al dispensado de hidrógeno a presión. Además, incluye un apartado sobre la generación in situ del hidrógeno, en el que se mencionan las condiciones que deben cumplir los electrolizadores.
- **ISO 227341:2008** Generadores de hidrógeno mediante electrólisis de agua. Aplicaciones industriales y comerciales: Define los requisitos de los equipos en los que se producen las reacciones electroquímicas para producir el hidrógeno a partir del agua.
- **ISO/TS 19880:2016:** Estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso.
- **SAE J2601:** Protocolos de abastecimiento de combustible para vehículos ligeros de superficie de hidrógeno gaseoso. Se establecen los límites de protocolo y proceso para el abastecimiento de hidrógeno de vehículos ligeros, estos límites de proceso (temperatura del combustible, tasa máxima de flujo de combustible, y tasa de aumento de la presión y la presión final) se ven afectados por los factores como la temperatura ambiente, la temperatura de entrega del combustible y la presión inicial en el sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido del vehículo.

SAE J2601 incluye protocolos para dos presiones (35 y 70 MPa), tres temperaturas de suministro de combustible (-40°C, -30°C, -20°C), y tamaños de sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido de 49,7 a 248,6 L.

- **SAE J2719:** Calidad del combustible de hidrógeno para vehículos de pila de combustible.

5 CONCLUSIONES

La tecnología de vehículos con celdas de combustibles de hidrógeno ha logrado un enorme progreso, cada vez con más modelos de FCEV en el mercado, sin llegar a alcanzar hasta el momento a los vehículos eléctricos con batería. Sin embargo, el sistema de suministro de combustible de hidrógeno no está lo suficiente desarrollado, y este desarrollo de la infraestructura del hidrógeno es una condición previa crítica para la introducción exitosa de los vehículos de combustible de hidrógeno. Para ello, es necesaria la planificación y coordinación entre las partes interesadas, gobiernos, industria e inversores. Como se ha comentado en el apartado de la situación mundial, es evidente que la política de los países apunta en la dirección del hidrógeno como posible sustituto a los combustibles fósiles convencionales, ante la emergencia climática y el incremento de los precios de estos. Concretamente, en Europa, el hidrógeno tiene especial importancia en los programas de proyectos europeos de los próximos años.

Se han explicado los principales componentes de las estaciones de servicio de hidrógeno en función del tipo (On-site, Off-site, de hidrógeno gaseoso, de hidrógeno líquido, de hidrógeno producido mediante electrólisis, de hidrógeno producido mediante reformado de metano con vapor), siendo los compresores, el almacenamiento y los sistemas de producción aquellos que más influyen en los costes de la HRS. Con respecto a la normativa de aplicación, hoy en día se están desarrollando códigos y estándares específicos para las hidrogeneras, ya que hasta el momento no se habían elaborado. La normativa aplicable a las HRS es muy amplia, destacan algunas normativas más generales como pueden ser la prevención de incendios, distribución y utilización de combustibles gaseosos, atmósferas explosivas, transporte de gas, almacenamiento de gas comprimido; y otras más específicas como especificaciones técnicas de los puntos de repostaje de hidrógeno, hidrógeno como combustible, ó puntos de suministro de hidrógeno al aire libre.

Por lo tanto, para que el hidrógeno verde en el sector del transporte sea competitivo y lograr la transición hacia una movilidad basada en el H₂, es necesario el desarrollo de las estaciones de hidrógeno. Actualmente hay múltiples proyectos tanto a nivel nacional como internacional que están desarrollando diferentes tipos de HRS, y este número irá en aumento en los próximos años. En la siguiente gráfica se muestra la demanda mundial de hidrógeno por sector en los próximos años (2020-2030) según la Agencia Internacional de la Energía, y, como se puede observar, la demanda seguirá aumentando en el sector del transporte, así como en otros.

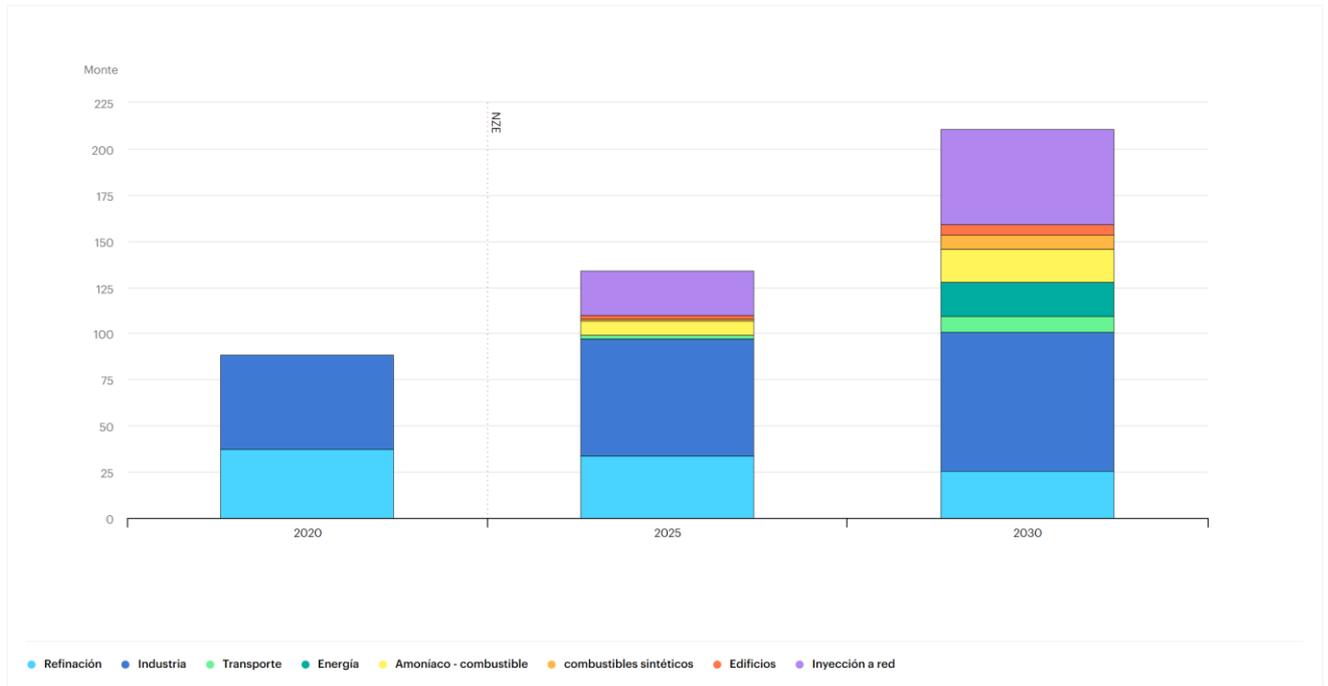


Figura 54: Demanda mundial de hidrógeno por sector 2020-2030 [12]

REFERENCIAS

- [1] A. García Rodríguez, «Estudio tecno-económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de fundación hidrógeno Aragón,» Zaragoza, 2020.
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), «Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable,» Madrid, 2020.
- [3] R. Álvarez Fernández y O. Pérez-Dávila, «Fuel cell hybrid vehicles and their role in the decarbonisation of road transport,» *Journal of Cleaner Production*, nº 342, 2022.
- [4] S. Aminzadegan, M. Shahriari, F. Mehranfar y B. Abromavic, «Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review,» *Energy Reports*, nº 8, pp. 2508-2529, 2022.
- [5] H. Shekhar Das, C. Wei Tan y A. H. M. Yatim, «Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 76, pp. 268-291, 2017.
- [6] B. Tanç, H. Turan Arat, E. Baltacioglu y K. Aydın, «Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles,» *Hydrogen Energy*, nº 44, pp. 10120-10128, 2019.
- [7] B. Lebrouhi, J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz y T. Kouskoou, «Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview,» *Hydrogen Energy*, nº 47, pp. 7016-7048, 2022.
- [8] K. Mazloomi y C. Gomes, «Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 16, pp. 3024-3033, 2012.
- [9] J. L. G. Fierro, «El hidrógeno: metodologías de producción,» *Fundación General CSIC*, 2011.
- [10] E. Maeso González y M. Marchante Lara, «Presente y futuro de las estaciones de suministro de hidrógeno».
- [11] D. L. Greene, J. M. Ogden y Z. Lin, «Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles,» *eTransportation*, nº 6, 2020.
- [12] «International Energy Agency. Hydrogen,» [En línea].

- [13] Z. Tian, H. Lu, W. Zhou, C. Zhang y P. He, «Review on equipment configuration and operation process optimization of hydrogen refueling station,» *Hydrogen Energy*, nº 47, 2022.
- [14] L. Silvestri, S. Di Micco, A. Forcina, M. Minutillo y A. Perna, «Power-to-hydrogen pathway in the transport sector: How to assure the economic sustainability of solar powered refueling stations,» *Energy Conversion and Management*, nº 252, 2022.
- [15] J. Martín, «Motor pasión: cómo funciona un coche de pila de combustible de hidrogeno,» Febrero 2020. [En línea].
- [16] P. Kiran Maroti, S. Padmanaban, M. Sagar Bhaskar, V. K. Ramachandaramurthy y F. Blssbjerg, «The state-of-art of power electronics converters configurations in electric vehicle technologies,» *Power Electronic Devices and Components*, vol. 1, 2022.
- [17] C. Camilo Monroy, C. Alejandro Siachoque, I. C. Durán-Tovar y A. R. Muralanda Guerra, «Estudio comparativo de un sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en vehículo eléctricos de batería,» 2020.
- [18] «www.movilidadelectronica.com,» 2021. [En línea].
- [19] «www.autobild.es/noticias_2021,» 2021. [En línea].
- [20] «www.hyundai.com/es/modelos/nexo.html,» [En línea].
- [21] «www.motor.es/noticias_2021,» [En línea].
- [22] «motorpasion.com/coches-electricos/esta-vivo-hyperion-xp-1,» Enero 2021. [En línea].
- [23] «h2me.eu,» [En línea]. Available: <https://h2me.eu/about/hydrogen-refuelling-infrastructure/>.
- [24] «<https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>,» 2017. [En línea].
- [25] A. Tafalla Asín, «Estudio de un sistema de almacenamiento de gases para una hidrogenera,» Zaragoza, 2021.
- [26] «El CSIC impulsa la primera hidrogenera de uso público de España,» *La Nueva España*, 16 Enero 2022.
- [27] «NREL H2 Tool,» 2020. [En línea].
- [28] «H2stations.org,» [En línea].
- [29] «www.H2stations.org,» [En línea].
- [30] «www.apilados.com,» [En línea].
- [31] «www.glpautogas.com/info,» Mayo 2022. [En línea].
- [32] «Energías-renovables.com "Así queda el primer mapa de estaciones de servicio de hidrógeno de España",» julio 2021. [En línea].

- [33] U. d. Sevilla, *Almacenamiento de hidrógeno. Sistemas basados en el hidrógeno.*, Sevilla, 2022.
- [34] «seafuel.eu,» 2022. [En línea].
- [35] «hidrogeno-verde.es,» 2022. [En línea].
- [36] «naturgy.es,» 2021. [En línea].
- [37] «enagas.es,» 2021. [En línea].
- [38] «greenhysland.eu,» [En línea].
- [39] «iberdrola.com,» [En línea].
- [40] «www.motorpasion.com,» 2022. [En línea].
- [41] P. Montaner Izcue, «Project management de un proyecto de transporte urbano mediante tecnologías de hidrógeno para la exposición internacional expoagua Zaragoza 2008,» 2008.
- [42] J. Thovar Puebla, *Modelo de una hidrogenera sostenible para el abastecimiento de una flota de autobuses en la isla de El Hierro*, Madrid, 2018.
- [43] A. Rozas Romero, *Estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno*, Sevilla, 2019.
- [44] H. Luo, J. Xiao, P. Bénard, R. Chahine y T. Yang, «Multi-objective optimization of cascade storage system in hydrogen refuelling station for minimum cooling energy and maximum stage of charge,» *Hydrogen Energy*, 2022.
- [45] H. Luo, P. Bénard, R. Chahine y T. Yang, «Multi-objective optimization of cascade storage system in hydrogen refuelling station for minimum cooling energy and maximum stage of charge,» *Hydrogen Energy*, 2022.
- [46] «<https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>,» 2017. [En línea].
- [47] «www.h2b2.es,» [En línea].

