

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de la Energía

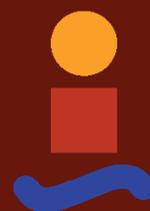
### Estado del Arte de las estaciones de servicio de hidrógeno

Autor: Antonio Rozas Romero

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

**Dpto. Ingeniería energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía

# **Estado del Arte de las estaciones de servicio de hidrógeno**

Autor:

Antonio Rozas Romero

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Estado del Arte de las estaciones de servicio de hidrógeno

Autor: Antonio Rozas Romero

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia el apoyo que siempre me han dado en estos años, gracias a ello ha sido un poco más fácil. En segundo lugar, a mis compañeros con los que he compartido tantos momentos de clases y estudios y finalmente, a aquellos buenos profesores que saben transmitir y levantarnos la curiosidad y el interés acerca de todo lo relacionado con esta carrera, en especial a mi tutor, Felipe Rosa, por su confianza y paciencia que ha tenido conmigo.

*Antonio Rozas Romero*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

En este trabajo, se realiza un estudio del estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno. En primer lugar, se pone el contexto la situación energética actual y se analiza distintos elementos clave para comprender el estado actual de esta tecnología, como es el uso del hidrógeno como combustible, la tecnología del vehículo de hidrógeno... Además de los distintos proyectos que se están llevando actualmente.

A continuación, se realiza un estudio de los distintos elementos técnicos que conforma la hidrogenera, como son los distintos métodos de repostaje que existe, así como el sistema de almacenamiento o la propia refrigeración que hay que aplicar, además de las distintas medidas de seguridad que se tienen en cuenta en este tipo de instalaciones.

Finalmente, se analiza desde un punto de vista económico los costes asociados a la construcción y operación de la estación de servicio de hidrógeno.



# Abstract

---

In this work, a study of the state of the art of hydrogen service stations is carried out. First, the context of the current energy situation is put into place and different key elements are analyzed to understand the current state of this technology, such as the use of hydrogen as fuel, hydrogen vehicle technology ... In addition to the different projects that are they are currently carrying.

Next, a study of the different technical elements that make up the HRS is carried out, such as the different refueling methods that exist, as well as the storage system or the cooling itself that must be applied, in addition to the different safety measures that they are taken into account in this type of facilities.

Finally, the costs associated with the construction and operation of the hydrogen service station are analyzed from an economic point of view.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Situación energética actual</b>	<b>1</b>
<b>2 El hidrógeno como combustible</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Combustión directa</i>	5
2.2. <i>Reacción electroquímica</i>	8
<b>3 Vehículo de hidrógeno</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Vehículos de combustión interna</i>	11
3.1.1 Motor de cuatro tiempos	11
3.1.2 Motor Wankel	14
3.2 <i>Vehículos eléctricos de pila de combustible</i>	16
3.3 <i>Situación actual y perspectivas a futuro</i>	18
<b>4 Proyectos en marcha</b>	<b>19</b>
4.1 <i>Proyectos a nivel europeo</i>	19
4.1.1 Hydrogen for Innovative Vehicles (HyFIVE)	19
4.1.2 Hydrogen Mobility Europe (H <sub>2</sub> ME)	20
4.2 <i>Proyectos a nivel nacional</i>	24
4.2.1 Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica (H <sub>2</sub> piyR)	24
4.2.2 Hydrogen corridors (H <sub>2</sub> C)	25
<b>5 Aspectos generales de las HRS</b>	<b>27</b>
<b>6 Almacenamiento de hidrógeno</b>	<b>31</b>
6.1 <i>Almacenamiento en estado líquido</i>	31
6.2 <i>Almacenamiento en estado gaseoso</i>	32
<b>7 Sistemas de repostaje</b>	<b>35</b>
7.1 <i>Sistemas de repostaje con almacenamiento de CGH<sub>2</sub></i>	35
7.1.1 Sistema en cascada	35
7.1.2 Sistema de compresión directa	38
7.1.3 Sistema de compresión directa con acumulador	39
7.2 <i>Sistemas de repostaje con almacenamiento inicial de LH<sub>2</sub></i>	40
7.2.1 Con dispensador de CGH <sub>2</sub> y ciclo de refrigeración	40
7.2.2 Con dispensador de CGH <sub>2</sub> y sin emplear ciclo de refrigeración	41
7.2.3 Con dispensador de LH <sub>2</sub> y CGH <sub>2</sub>	42

<b>8</b>	<b>Sistemas de refrigeración</b>	<b>43</b>
8.1	<i>Efecto Joule-Thomson</i>	43
8.2	<i>Tecnología aplicada</i>	45
<b>9</b>	<b>Aspectos de seguridad</b>	<b>47</b>
9.1	<i>Protección contra incendios y peligro de explosión [44]</i>	47
9.2	<i>Requisitos de los emplazamientos de los tanques de almacenamiento de H<sub>2</sub> [44]</i>	48
9.2.1	A nivel de suelo	48
9.2.2	Bóvedas subterráneas	48
9.2.3	Parte superior de la marquesina	48
9.2.4	Cubierta	49
9.3	<i>Sistemas de ventilación [44]</i>	49
9.4	<i>Principios y operaciones de emergencia [44]</i>	49
<b>10</b>	<b>Análisis de costes</b>	<b>50</b>
10.1	<i>Introducción general</i>	50
10.2	<i>Evolución del coste capital</i>	51
10.3	<i>Análisis de componentes en función a su coste</i>	52
10.3.1	Compresor	52
10.3.2	Tanques de almacenamiento	52
10.3.3	Dispensador	53
10.3.4	Sistema de refrigeración e intercambiador de calor	54
10.4	<i>Efecto del coste de la HRS con el precio del H<sub>2</sub></i>	55
<b>11</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>58</b>
	<b>Referencias</b>	<b>60</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Propiedades del hidrógeno [5]	5
Tabla 2-2. Comparativa del hidrógeno con otros combustibles [5]	6
Tabla 2-3. Flash points de distintos tipos de combustibles [5]	7
Tabla 2-4. Límites de explosividad en aire de distintos combustibles [5]	7
Tabla 2-5. N° de octanos de distintos combustibles [5]	8
Tabla 3-1. Comparativa del modelo convencional con el de hidrógeno [13]	13
Tabla 3-2. Prestaciones del Hyundai Nexó [19]	17
Tabla 5-1. Origen de la obtención del hidrógeno [24]	29
Tabla 10-1. Coste de la HRS en función de la capacidad y generación [46]	50

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Gráfica de la evolución de la demanda energética en el Escenario de Nuevas Políticas [3]	1
Figura 1-2. Gráfica de la evolución de la demanda energética en el Escenario de Desarrollo Sostenible [3]	2
Figura 1-3. Comparativa de los 3 escenarios [2]	2
Figura 1-4. Capacidad de nuevos proyectos para la producción de hidrógeno con fines energéticos [4]	4
Figura 2-1. Reacción electroquímica en la pila de combustible [7]	9
Figura 2-2. Tensión de la pila en función de la corriente [9]	10
Figura 3-1. Fases del ciclo del motor a cuatro tiempos. [10]	11
Figura 3-2. Diagrama p – V del ciclo termodinámico del motor a 4 tiempos [12]	12
Figura 3-3. BMW 750 hL [14]	13
Figura 3-4. Fases del ciclo del motor Wankel. [16]	14
Figura 3-5. RX-8 Hydrogen RE [17]	15
Figura 3-6. Diagrama de equipos del FCEV [18]	16
Figura 3-7. Hyundai Nexo [19]	17
Figura 3-8. Evolución del número de FCEV por países [4]	18
Figura 4-1. Consorcio de empresas de HyFIVE [20]	19
Figura 4-2. Localización de las HRS del proyecto HyFIVE [20]	20
Figura 4-3. . Localización de las HRS del proyecto H2ME [21]	21
Figura 4-4. Diagrama de una HRS de optimización y equilibrio de la red [21]	22
Figura 4-5. Diagrama de una HRS de producción “off site” [21]	22
Figura 4-6. Diagrama de una HRS de producción “on site” [21]	23
Figura 4-7. Localización de las HRS del proyecto H2piyR [22]	24
Figura 4-8. Consorcio de empresas del H2piyR [14]	25
Figura 4-9. Tren del proyecto H2C [23]	26
Figura 5-1. Diagrama de barras de HRS con respecto al nº de FCEV por estación	27
Figura 5-2. Vista general de una estación de suministro de hidrógeno [25]	28
Figura 5-3. Esquema conceptual de los sistemas que intervienen en la HRS. Elaboración propia.	30
Figura 6-1. Tanque de hidrógeno líquido [29]	31
Figura 6-2. Almacenamiento estacionario de hidrógeno líquido [29]	32
Figura 6-3. Clasificación de los tanques de almacenamiento de CGH <sub>2</sub> [29]	33
Figura 6-4. Tanques tipo I [31]	33
Figura 6-5. Tanque tipo II [32]	34
Figura 6-6. Tanque tipo III [33]	34

Figura 6-7. Tanque tipo IV [34]	34
Figura 7-1. Esquema del sistema de repostaje en cascada. Elaboración propia.	35
Figura 7-2. Diagrama Presión – tiempo del proceso de repostaje [36]	36
Figura 7-3. Tabla de valores de presiones de la SAE J2601	37
Figura 7-4. Esquema del sistema de repostaje de compresión directa. Elaboración propia	38
Figura 7-5. Esquema del sistema de compresión directa con acumulador. Elaboración propia	39
Figura 7-6. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de CGH <sub>2</sub> y con ciclo de frío a partir de LH <sub>2</sub>	40
Figura 7-7. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de CGH <sub>2</sub> y sin ciclo de frío a partir de LH <sub>2</sub>	41
Figura 7-8. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de LH <sub>2</sub> y CGH <sub>2</sub> a partir de LH <sub>2</sub> [40]	42
Figura 8-1. Diagrama P-h. Elaboración propia	43
Figura 8-2. Diagrama T-p [42]	44
Figura 8-3. Diagrama T-p [42]	44
Figura 8-4. Diagrama P-h del ciclo de refrigeración [43]	45
Figura 8-5. Diagrama de equipos de la PCU. Elaboración propia	46
Figura 9-1. Energía de activación en función a la concentración [45]	48
Figura 10-1. Evolución del coste capital de la HRS [46]	51
Figura 10-2. Coste del compresor en función a la producción anual [47]	52
Figura 10-3. Coste del tanque de almacenamiento en función a la producción anual [47]	53
Figura 10-4. Coste del dispensador en función a la producción anual [47]	53
Figura 10-5. Diagrama del peso de cada parte con respecto al coste del dispensador [47]	54
Figura 10-6. Curvas de costes del sistema de refrigeración. [47]	55
Figura 10-7. Contribución de los distintos sistemas al coste nivelado de la HRS [48]	56
Figura 10-8. Coste nivelado de la HRS en diversas situaciones [48]	56
Figura 11-1. Diagrama de barras de ventas de vehículos de nueva matriculación [47]	58

# Notación

---

tep	Toneladas equivalentes de petróleo
AIE	Agencia Internacional de la Energía
GN	Gas natural
PCI	Poder Calorífico Inferior
LPG	Gas licuado del petróleo
H	Hidrógeno
H <sub>2</sub>	Hidrógeno diatómico
O <sub>2</sub>	Oxígeno diatómico
H <sub>2</sub> O	Agua
$\dot{Q}$	Calor
$\dot{W}_{eléc}$	Trabajo eléctrico
$e^{-}$	Electrón
H <sup>+</sup>	Catión de hidrógeno
PMS	Punto muerto superior
FCEV	Vehículo eléctrico de pila de combustible
HRS	Estación de repostaje de hidrógeno
LH <sub>2</sub>	Hidrógeno líquido
CGH <sub>2</sub>	Hidrógeno comprimido
BEV	Vehículo eléctrico de batería
ICE	Vehículo de combustión interna
HEV	Vehículo híbrido
PHEV	Vehículo híbrido enchufable



# 1 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL

Desde tiempos de la Revolución Industrial, las sociedades occidentales han ido desarrollando una mayor explotación y dependencia a los recursos fósiles, como consecuencia, han permitido un desarrollo tecnológico sin precedentes, logrando alcanzar grandes cotas de prosperidad y bienestar para la población. Sin embargo, como fruto a esta dinámica de consumo, se ha disparado la demanda energética y las emisiones de partículas contaminantes a valores insostenibles, se estima que anualmente se consume del orden de 12000 millones de tep, que, si lo comparamos con la energía primaria contenida en la Tierra, unos 50000 millones de tep, producen grandes desequilibrios en los límites naturales del planeta. [1]

Es por ello, que grandes instituciones como la AIE, ha realizado estudios sobre los posibles escenarios a futuro en función de las medidas que se lleven a cabo:

- En el denominado como **Escenario de Políticas Actuales** (Current Policies Scenario), en el cual el fuerte crecimiento de los combustibles fósiles será predominante frente a una pequeña participación de las renovables. El uso del carbón continuará aumentando por el fuerte consumo en los países en desarrollo. A falta de compromisos adicionales para mejorar la eficiencia del combustible del vehículo, la demanda de petróleo se verá aumentada un 25% hasta 2040. [2]
- En el **Escenario de Nuevas Políticas** (New Policies Scenario), la demanda mundial de energía primaria crece en más de una cuarta parte entre hoy y 2040. Las tendencias estructurales generales que moldean la demanda son el crecimiento de la población, la urbanización y el crecimiento económico. Las políticas energéticas también desempeñan un papel fundamental, especialmente las relacionadas con la eficiencia energética, los recursos renovables, las medidas para reducir la contaminación del aire y la eliminación de los subsidios a los combustibles fósiles. [2]

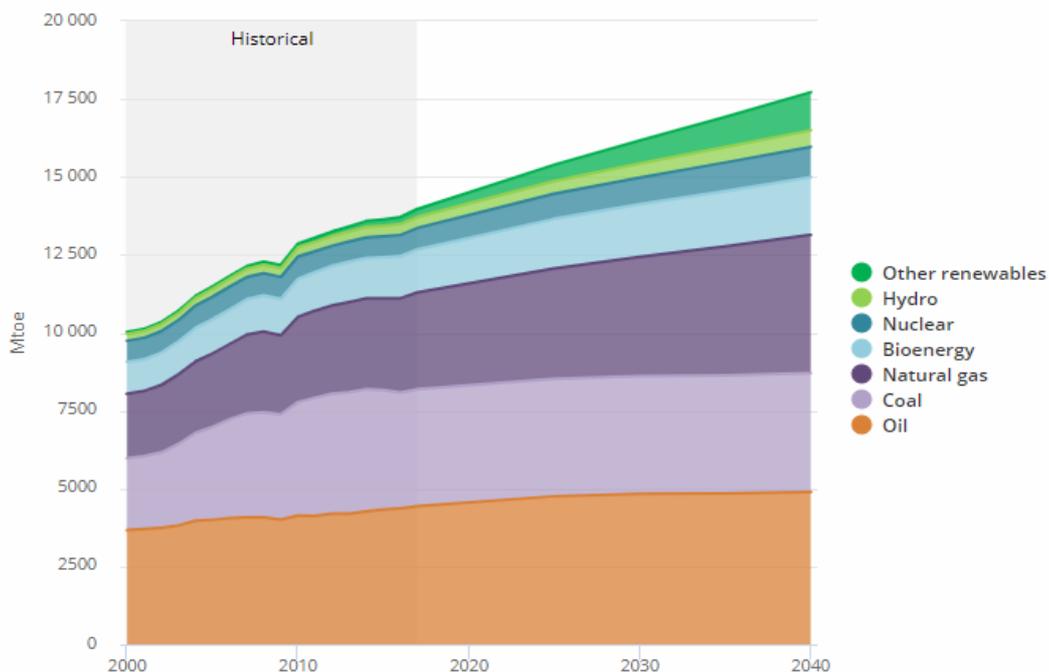


Figura 1-1. Gráfica de la evolución de la demanda energética en el Escenario de Nuevas Políticas [3]

- Y finalmente, en el **Escenario de Desarrollo Sostenible** (Sustainable Development Scenario), la curva de demanda es prácticamente plana hasta el 2040, lo que refleja en parte el potencial continuo de la eficiencia energética para reducir el consumo. [2]

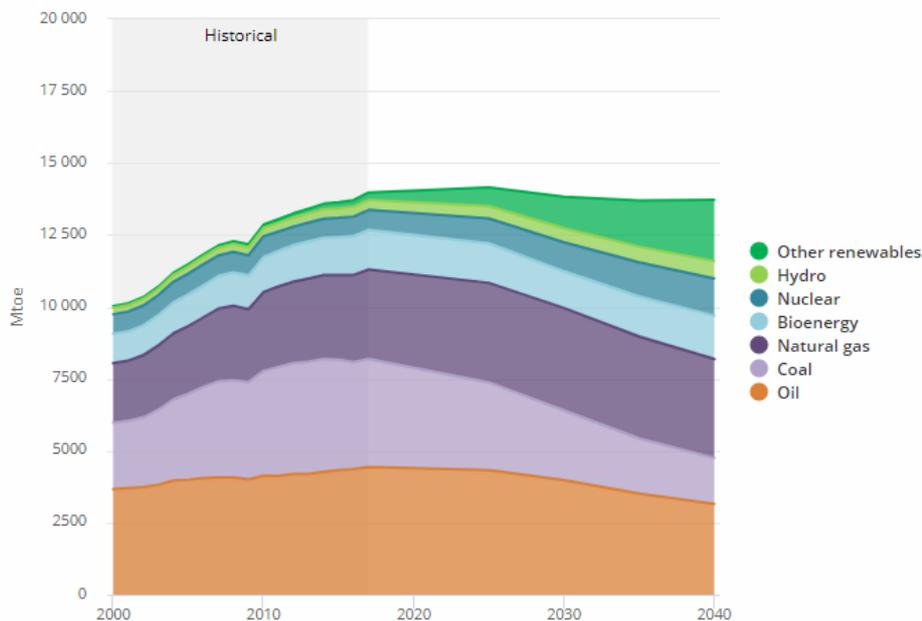


Figura 1-2. Gráfica de la evolución de la demanda energética en el Escenario de Desarrollo Sostenible [3]

Es por ello, que las políticas actuales que se están tomando a cabo para lograr un modelo económico más respetuoso con el medio ambiente son claramente insuficiente. Para lograr alcanzar un nivel de desarrollo sostenible, se requiere de transiciones energéticas de gran calado y en un espacio corto de tiempo, a través de inversiones en tecnologías energéticas limpias, eficientes e inteligentes, además de la adaptación técnica los diversos elementos de suministro de energía como las redes de transporte y distribución (impulso de la SmartGrid). [2]

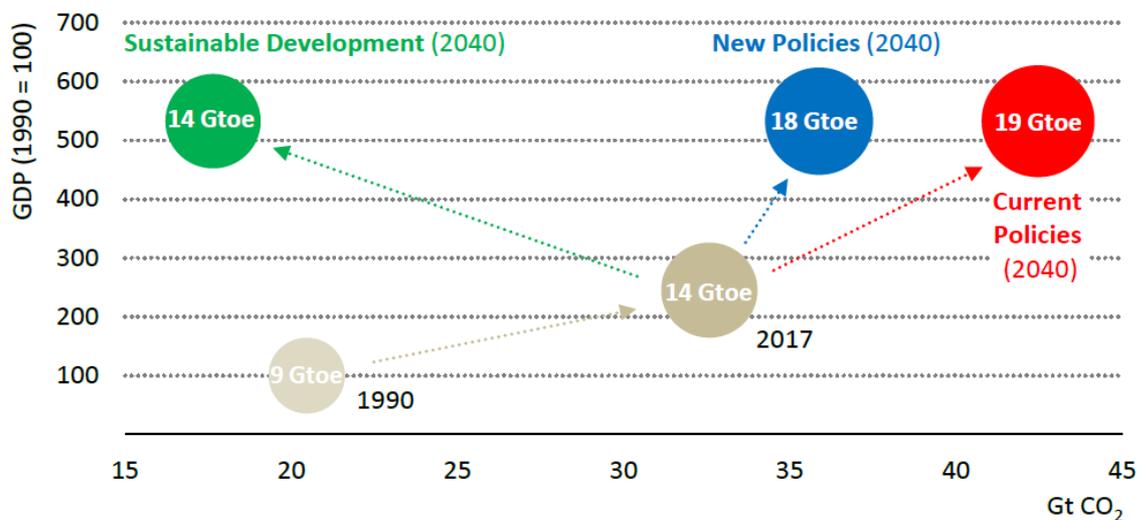


Figura 1-3. Comparativa de los 3 escenarios [2]

Es por ello, que la Tecnología del Hidrógeno tendrá un papel fundamental en el proceso de transformación del modelo energético. Así pues, enumeramos las principales aplicaciones en las que tendrá especial relevancia:

- **Sectores donde es difícil reducir las emisiones**

En el Acuerdo de París de 2015, los países firmantes se comprometieron a alcanzar emisiones netas nulas en todos los sectores para el año 2050. Se está haciendo mayor hincapié en aquellos sectores que por su idiosincrasia resulta más complicado reducir las emisiones de contaminantes, aquellos donde el uso final de la energía no es en forma de electricidad, sino que corresponde a combustibles para aprovechar su energía térmica en un proceso de combustión, lo cual provoca grandes emisiones de CO<sub>2</sub> durante el proceso. Como es el caso de la industria química, la siderurgia o el sector transportes. Es por ello por lo que el hidrógeno se podría emplear de forma análoga al GN, el petróleo o el carbón. [4]

- **Contribución en la aplicación de medidas de mayor calado**

El uso del hidrógeno puede tener aplicaciones en materia de seguridad energética, en la reducción de la contaminación del aire local, en el desarrollo económico y en el acceso de la energía.

En cuanto al apoyo a la seguridad energética, en los puntos donde exista una infraestructura eléctrica adecuada, la electricidad se puede convertir en hidrógeno y viceversa, o en otros combustibles, lo cual hace que los consumidores sean menos dependientes a recursos energéticos específicos además de incrementar la viabilidad de las energías de reserva.

Así pues, el uso del hidrógeno mejoraría la calidad del aire, en especial en entornos urbanos. Cuando se emplea como combustible para vehículos o para aparatos de calefacción, en su transformación el hidrógeno no genera partículas contaminantes.

Además, gracias a las mejoras en los diseños integrados de los electrolizadores, el almacenamiento y las celdas de combustible, permiten ser de gran utilidad si se emplean como sistema de energía auxiliar para instalaciones que no pueden tener cortes en el suministro eléctrico como es el caso de los hospitales, en comparación con los sistemas basados en baterías, permiten un mejor almacenamiento en aplicaciones que requieren periodos de tiempo más largos. Aunque estos sistemas sigan siendo caros, puede ser interesante su aplicación en zonas de baja demanda eléctrica y que, además, no se espera un desarrollo de la red eléctrica a corto plazo, como puede ser en algunas partes de África. [4]

- **Impulso al desarrollo de las energías renovables**

A medida que el coste de la energía solar y eólica se reducen y, por ende, se profundiza su participación en el mix energético, podría producir problemas en la estabilidad de la red eléctrica debido a la gran variabilidad de su producción. Es por ello que el uso del hidrógeno tendrá un papel fundamental debido a su aplicación como almacenamiento de energía. Si la generación de energía renovable se vuelve lo suficientemente barata y generalizada, además de producir energía eléctrica libre de emisiones, va a permitir generar hidrógeno que, en un futuro, podrá ser capaz de desplazar a los combustibles fósiles en el transporte, la calefacción, en entornos industriales y en casi en cualquier aplicación que no sea susceptible a la electrificación. [4]

- **El desarrollo de tecnologías limpias promueve el uso de hidrógeno**

Como es el caso en el sector del transporte, alrededor de 11 200 automóviles impulsados por hidrógeno ya están en la carretera a nivel mundial, además de que ya existe varios modelos de vehículo en el mercado. Debido a las ventajas específicas del hidrógeno en el uso en almacenamiento, más de 20 000 carretillas elevadoras de hidrógeno están en uso. Cuando la AIE publicó su hoja de ruta en la tecnología del hidrógeno y pilas de combustible en 2015, solo había 80 estaciones de servicio. Actualmente, hay 381 estaciones de abastecimiento de hidrógeno en funcionamiento. Alrededor de 275 000 sistemas de cogeneración de celdas de combustible, alimentados con gas natural, se han instalado en Japón. Además, se ha logrado reducir los costes de las celdas de combustible un tercio de su precio de 2015. Por otro lado, la durabilidad de la pila de combustible era de hasta 10 000 horas, actualmente se está logrando conseguir celdas de combustible estacionarias que funcionan hasta 80 000 horas. [4]

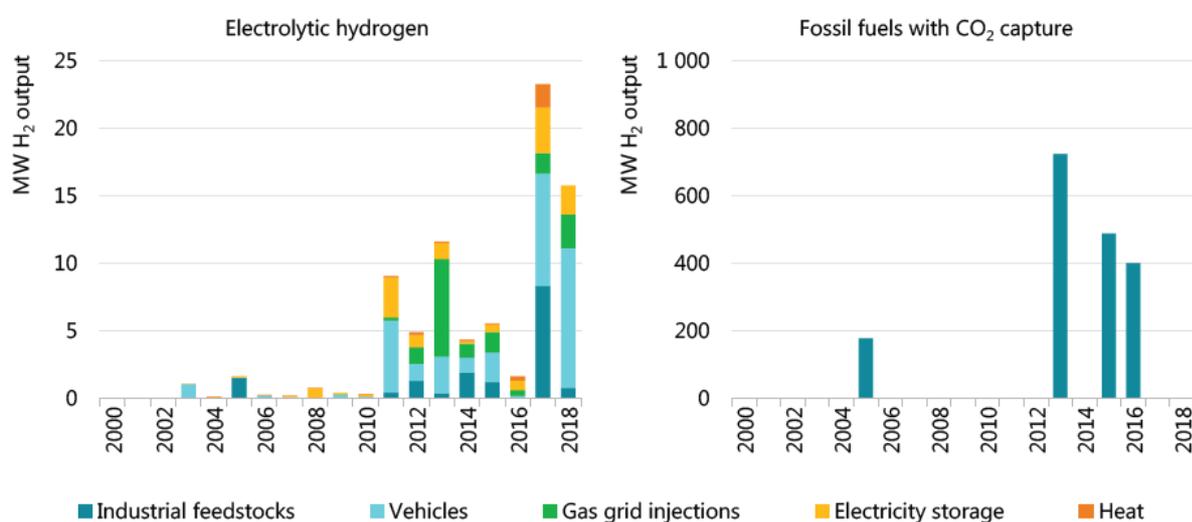


Figura 1-4. Capacidad de nuevos proyectos para la producción de hidrógeno con fines energéticos [4]

## 2 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

### 2.1. Combustión directa

El hidrógeno es la sustancia más abundante y simple del universo. Es un elemento incoloro, inodoro e insípido. A diferencia de los combustibles convencionales a base de petróleo y los derivados del gas natural, tiene una estructura molecular muy pequeña y ligera. El hidrógeno tiene un contenido de energía por masa de  $143 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , una cifra que es hasta tres veces más grande que los combustibles líquidos basados en hidrocarburos. Por otro lado, el hidrógeno tiene una densidad muy baja en estado gaseoso y su licuefacción es un proceso de muy alto consumo energético, del orden de un tercio de su PCI. Además, el hidrógeno no se encuentra como una sustancia independiente de forma natural, normalmente se encuentra unido a carbono y oxígeno. [5]

En la siguiente tabla, se recoge sus propiedades más relevantes:

Tabla 2-1. Propiedades del hidrógeno [5]

Propiedad	Valor
Nombre, símbolo, número	Hidrógeno, H, 1
Categoría	No metal
Peso atómico	1.008
Electrones, protones, neutrones	1, 1, 0
Color, olor	Incoloro, inoloro
Toxicidad	No, asfixiante simple
Fase	Gas
Densidad	Gas: $0.089 \text{ g l}^{-1}$ ; líquido: $0.07 \text{ g cm}^{-3}$
Energía de ionización	$13.5989 \text{ eV}$
Ratio de expansión de L a G	1:848 (Condiciones atmosféricas)
Punto de fusión y ebullición	$-259.14 \text{ °C}$ , $-252.87 \text{ °C}$
Poder Calorífico Inferior (PCI)	$118.8 \text{ MJ kg}^{-1}$
Temperatura de la llama adiabática	$2107 \text{ °C}$
Límites de explosividad en aire	4 – 75 %
Velocidad de la llama laminar	$3.06 \text{ m s}^{-1}$
Flash point	$-253 \text{ °C}$
Temperatura de autoignición	$585 \text{ °C}$
Research octane number (RON)	>130

Frente a la perspectiva de agotamiento que tienen los recursos fósiles, el hidrógeno, en cambio, tiene una viabilidad a muy largo plazo. Además, de que podría producirse mediante una gran variedad de métodos y prácticamente en cualquier parte del mundo. El hidrógeno empleado como combustible, podría ser suministrado a una amplia gama de consumidores desde turbinas, motores de combustión interna y celdas de combustible, así como hornos y calentadores de cocina. La producción y el consumo de hidrógeno a microescala, así como a macro y mega escala son factibles. Su consumo viene aparejado con un mínimo de emisiones contaminantes y el subproducto generado es solo agua, independientemente del método de utilización. Además, podemos agregar hidrógeno a otros combustibles para formar mezclas enriquecidas. El hidrógeno podría usarse como combustible alternativo para motores diseñados para funcionar con otras formas de combustible donde su amplio rango de inflamabilidad proporciona una potencia del motor fácilmente controlable. [5]

En primer lugar, realizando una comparativa con respecto a la energía que nos puede proporcionar por unidad de masa y volumen, como se puede apreciar, tiene el valor más alto por kilogramo de combustible, pero el principal problema que tiene es su baja densidad, como se observa en la tabla anterior, en estado gaseoso, se encuentra alrededor de  $0.089 \text{ g l}^{-1}$  y en el caso de estado líquido, de  $0.07 \text{ g cm}^{-3}$ , lo cual a un volumen determinado, la única manera de mejorar sus prestaciones es someter al depósito a altos valores de presión. [5]

Tabla 2-2. Comparativa del hidrógeno con otros combustibles [5]

Combustible	Energía por masa (MJ·kg <sup>-1</sup> )	Energía por volumen (MJ·l <sup>-1</sup> )
Hidrógeno (líquido)	143	10.1
Hidrógeno (comprimido a 700 bar)	143	5.6
Hidrógeno (presión ambiente)	143	0.0107
Metano (presión ambiente)	55.6	0.0378
Gas natural (líquido)	53.6	22.2
Gas natural (comprimdo a 250 bar)	53.6	9
Gas natural	53.6	0.0364
Propano LPG	49.6	25.3
Butano LPG	49.1	27.7
Gasolina	46.4	34.2
Biodiesel	42.2	33
Diesel	45.4	34.6

Analizando el flash point, el cual representa la temperatura a la cual un combustible genera suficiente vapor para formar una llama en su superficie en el aire mientras siga presente una fuente de ignición, del hidrógeno con otros combustibles, se puede observar que el hidrógeno tiene el flash point más bajo con respecto al resto.

Tabla 2-3. Flash points de distintos tipos de combustibles [5]

Combustible	Flash point (°C)
Hidrógeno	-231
Metano	-188
Propano	-104
Gasolina	-45
Metanol	11
Etanol (70 %)	17
Keroseno	36
Densidad	60
Diesel	62
Biodiesel	130

Este hecho presente una gran ventaja, si se aplica el hidrógeno como fuente de energía para un motor de combustión interna, éste requeriría un sistema de arranque y encendido mucho más simplificado. Además, el hidrógeno, al tener un rango tan amplio entre su menor nivel de inflamabilidad (LFL) y su mayor nivel de inflamabilidad (HFL), permite una amplia gama de posibilidades a la hora para emplearse como combustible para motores de combustión o turbinas. LFL y HFL son los niveles mínimos y máximos de concentración de combustible en el aire para hacer que la mezcla sea inflamable. Si el nivel de contenido de combustible alcanza valores por debajo de su LFL o por encima de su HFL, la mezcla de aire y combustible no será inflamable debido a la falta de combustible u oxígeno en la mezcla, respectivamente. [5]

Tabla 2-4. Límites de explosividad en aire de distintos combustibles [5]

Combustible	Límites de explosividad en aire (%)
Hidrógeno	4 – 75
Metano	5.3 – 15
Propano	2.2 – 9.6
Metanol	6 – 36.5
Gasolina	1 – 7.6
Diesel	0.6 – 5.5

Además de las ventajas mencionadas del consumo de hidrógeno sobre los combustibles basados en fósiles, debe considerarse también el índice de octano del hidrógeno. El número de octano indica la capacidad antidetonante de un combustible cuando se comprime dentro del cilindro de un motor. La detonación es el fenómeno de la formación de una segunda inflamación de combustible dentro del motor de combustión después de la explosión principal. Esta detonación se produce porque la temperatura excede el nivel de autoencendido del combustible. Los niveles más altos de octano describen una capacidad adicional para prevenir las inflamaciones automáticas no deseadas en las cámaras de combustión. [5]

El número de octano de investigación de un combustible es el método de calificación de octano global más común. Este número se obtiene mediante la detonación de un combustible en una cámara en condiciones de compresión variable (cilindro del motor) a nivel de laboratorio. Los números de octanos de investigación (RON) de algunos combustibles comparables se ilustran en la Tabla 5. Así pues, como podemos observar, el hidrógeno posee un elevado número de octano con respecto al resto combustibles tradicionales, esto permite elevar la relación de compresión del motor, y por consecuencia, un aumento del rendimiento volumétrico y energético del mismo. Además, dicho efecto genera una mejor contribución en la reducción de emisiones nocivas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) [6]

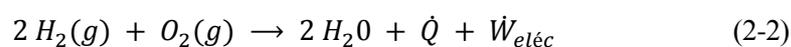
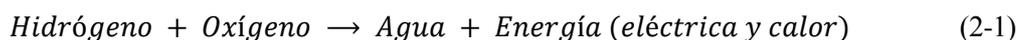
Tabla 2-5. N° de octanos de distintos combustibles [5]

Combustible	N° de octanos
Hidrógeno	>130
Metano	125
Etano	108
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diesel	30

## 2.2. Reacción electroquímica

Tras haber analizado el uso del hidrógeno como combustible, desde el punto de vista de un motor de combustión interna, a continuación, en este capítulo, vamos a analizar como se comporta el hidrógeno cuando se emplea en una pila de combustible.

En primer lugar, una celda de combustible corresponde a un dispositivo electroquímico con el cual se obtiene energía eléctrica a partir de la energía química del hidrógeno. Como elementos de entrada, se encuentra el propio hidrógeno y aire para comenzar la reacción química y como productos de la reacción, se obtiene corriente eléctrica, agua y calor residual. [7]



Una vez definida la ecuación química que representa la reacción global en la pila de combustible, vamos a analizar los procesos que se llevan a cabo en las membranas del ánodo y del cátodo.

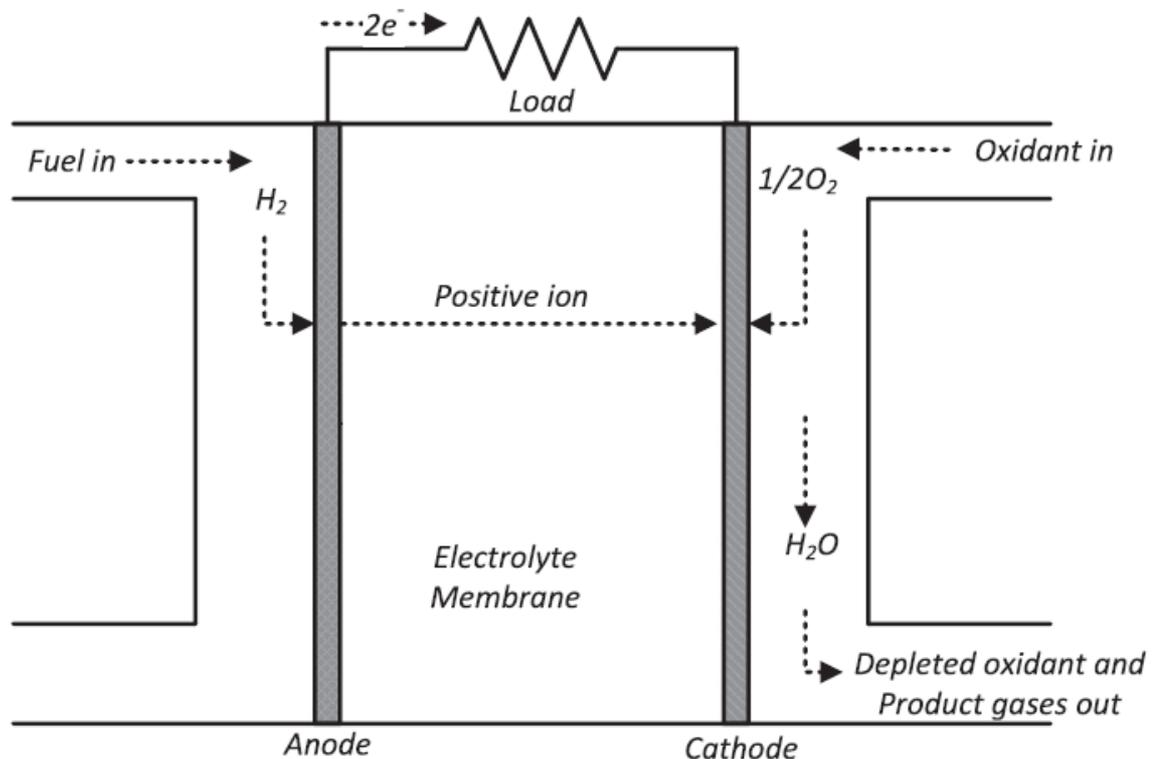
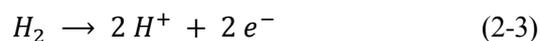
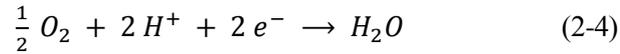


Figura 2-1. Reacción electroquímica en la pila de combustible [7]

En primer lugar, en el electrodo del ánodo, cuando el caudal de hidrógeno entra en contacto con ella, se produce la primera reacción electroquímica, en la que el hidrógeno se oxida y se descompone en un par de electrones, los cuales circulan a través de un circuito eléctrico externo, se flujo de electrones en movimiento genera la corriente eléctrica (energía eléctrica) y por otro lado, los iones, se trasladan hacia al cátodo a través de la membrana del electrolito. [8]



Tras esta primera semirreacción que se produce en el ánodo, en el cátodo entran en contacto el ion hidrógeno junto a los electrones y el oxígeno, en ese instante se produce la segunda semirreacción, en la cual como producto se produce agua. Un elemento importante en el diseño de las pilas de combustible es la evacuación eficaz de agua y el calor residual de la reacción, ya que se busca mantener un funcionamiento isotérmico para la producción eléctrica, así pues, un encharcamiento de la membrana por una extracción incorrecta del agua produce pérdidas en el rendimiento. [8]



El voltaje que produce la reacción en una celda, de forma teórica, es de valor 1,23 V. Lo cual en la práctica no se produce ya que que hay que tener distintas variables como la pérdida por activación, las pérdidas óhmicas y las pérdidas por concentración, de esa forma y teniendo en cuenta todos estos factores, se modela la curva característica de funcionamiento de la pila de combustible. [7]

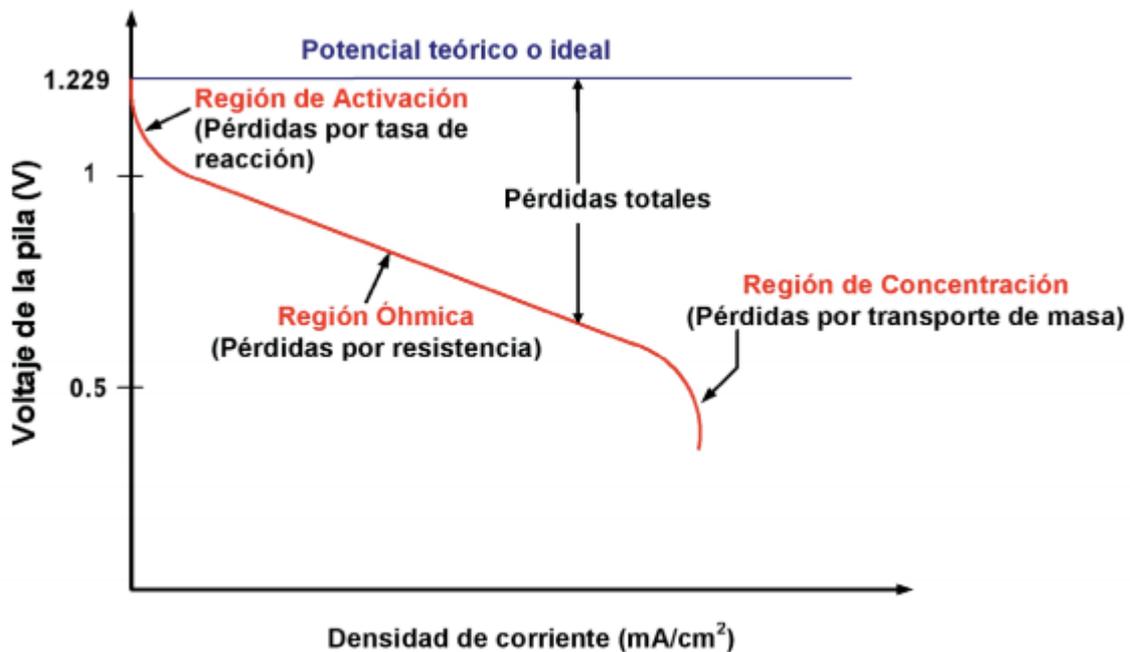


Figura 2-2. Tensión de la pila en función de la corriente [9]

Así pues, las pilas de combustibles se pueden clasificar teniendo en cuenta distintos factores, como por ejemplo su temperatura de operación, sus propiedades químicas o según el material que se emplee para la membrana del electrolito. Por tanto, teniendo en cuenta estas propiedades, se puede definir 6 tipos distintos, en primer lugar, si la temperatura de funcionamiento presenta valores bajos, se incluye en esta categoría la PEMFC (pila de combustible de intercambio protónico), la DMFC (pila de combustible de metanol directo), la PAFC (pila de combustible de ácido fosfórico) y la AFC (pila de combustible alcalina) y sus principales aplicaciones son en el sector transporte, como medio de alimentación de teléfonos móviles, PDA...

Por otro lado, las SOFC (pila de combustible de óxido sólido) y las MCFC (pila de combustible de carbono fundido) en cambio, tiene una temperatura de operación alta y se usan principalmente para generación de energía en situaciones estacionarias. [7]

Así pues, para este trabajo, nos vamos a centrar en las pilas de combustible que puedan usarse en el vehículo de hidrógeno, las cuales corresponde a las que tienen un rango de temperatura de operación relativamente bajo, a continuación, vamos a describir las características que tienen en dicha aplicación.

- **Alta eficiencia**

Por lo general, el rendimiento de una pila de combustible es del orden del doble en comparación con la eficiencia de un motor de combustión interna. Este hecho se debe en parte a que el número de transformaciones energéticas en una pila de combustible es menor que en el caso del motor de combustión, por la 2ª Ley de la Termodinámica, por cada proceso de transformación viene aparejada una entropía que supone pérdidas energéticas, por lo tanto, el rendimiento global de un sistema disminuye cuando aumenta el número de transformaciones energéticas.

Por otro lado, cuando el tipo de energía buscada es mecánica, en este caso, el número de transformaciones es igual tanto para la pila de combustible como para el motor de combustión interna, pero a pesar de esto, al ser el rendimiento de Carnot mucho más restrictivo que el rendimiento de la pila de combustible, sigue la FC teniendo mejores prestaciones en esta modalidad. [8]

- **Gran modularidad**

Permite una gran flexibilidad a la hora de acoplar nuevas celdas para la pila de combustible, lo cual, aporta una mayor facilidad a la hora de controlar la potencia de salida del sistema. Además, el rendimiento de la pila de combustible no se ve muy afectado por el tamaño del sistema (a diferencia de un motor térmico). Esta funcionalidad tendrá mucha aplicación sobre todo en sistemas de generación distribuida. [8]

- **Rápido seguimiento de la carga**

En general, las FC posee muy buenas características dinámicas en relación con la carga, esto se debe principalmente por la naturaleza de las reacciones electroquímicas que suceden en el interior de la pila de combustible, la cual suceden en muy corto espacio de tiempo. [8]

- **Naturaleza estática**

Debido a su naturaleza electroquímica, una pila de celdas de combustible es un dispositivo silencioso. Esta es una característica muy importante que fomenta el uso de celdas de combustible para aplicaciones de energía auxiliar y generación distribuida, además de aplicaciones portátiles que requieren un funcionamiento silencioso. El hecho de que un sistema de celdas de combustible tenga muy pocas piezas dinámicas (y por lo tanto, casi sin vibraciones) hace que el diseño, fabricación, ensamblaje, operación y análisis de las celdas de combustible sea más simple que el de los motores térmicos. [8]

- **Alto coste**

Uno de sus grandes inconvenientes de la pila de combustible es su aún alto coste. Se estima que debería reducirse su coste 10 veces por cada kW producido para que comiencen a ser competitivas en el mercado. Este alto coste es debido al uso del platino en la fabricación de los catalizadores, las delicadas técnicas de fabricación de las membranas y también por el material de revestimiento. [8]

- **Baja durabilidad**

Para que la pila de combustible sea una alternativa con expectativas a largo plazo en relación con la generación eléctrica en el mercado, debe aumentar su durabilidad del orden de 5 veces de los valores que tienen en la actualidad. Uno de los principales que existen en este sentido es la degradación de los materiales debido al rango de temperaturas en el que se opera con estos dispositivos, por tanto, debe ser un problema para abordar para incrementar la vida útil de las pilas de combustibles. [8]



# 3 VEHÍCULO DE HIDRÓGENO

Una vez analizado el contexto energético en el que nos encontramos y las propiedades físicas del hidrógeno, en este nuevo capítulo, vamos a analizar la tecnología del vehículo de hidrógeno, en ella, encontramos dos grandes grupos, en primer lugar, los que se basan en el uso de un motor de combustión interna convencional, en donde el hidrógeno se emplea propiamente como combustible. Y por otro lado, se encuentran los vehículos eléctricos de celda de combustibles, en este tipo de vehículo, el hidrógeno, tras un proceso de conversión electroquímica, se produce una corriente eléctrica la cual alimenta al motor eléctrico produciendo energía mecánica que permite el desplazamiento del vehículo.

## 3.1 Vehículos de combustión interna

Dentro de esta categoría, podemos distinguir los dos tipos de motor que se están llevando a cabo a base de combustible de hidrógeno, en primer lugar, el motor de cuatro tiempos, el cual, al igual que el basado en la combustión de la gasolina, se basa en el funcionamiento del ciclo Otto, y, en segundo lugar, el motor Wankel, el cual es de tipo rotativo. A continuación, se describirán sus características más importantes.

### 3.1.1 Motor de cuatro tiempos

Tal y como se define en su nombre, este tipo de motor alternativo tiene un ciclo operativo que se basa en el movimiento de 4 carreras del pistón por cada revolución de funcionamiento. Así pues, las fases del ciclo son las siguientes:

- Admisión de la carga en el cilindro
- Compresión de la carga
- Combustión y expansión
- Expulsión o escape de los productos de la combustión

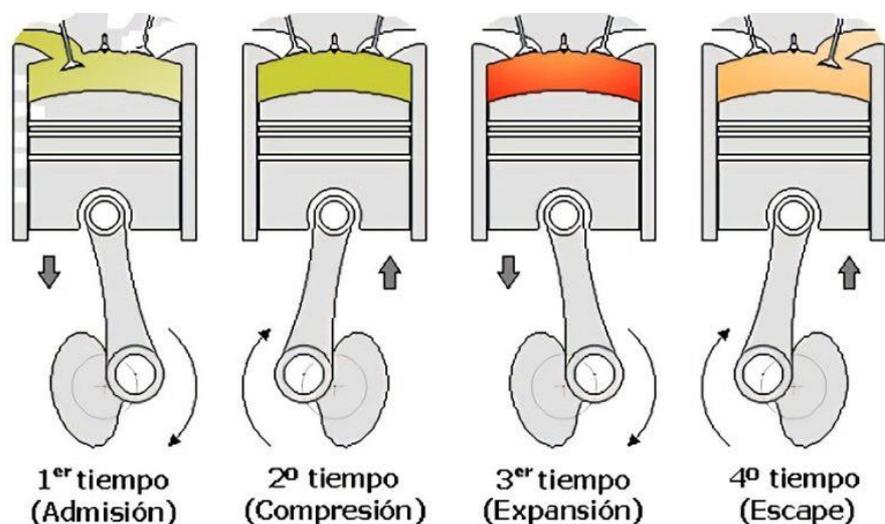


Figura 3-1. Fases del ciclo del motor a cuatro tiempos. [10]

- En la **admisión**, el pistón en la carrera hacia la parte baja crea una aspiración del fluido en el cilindro. En la cámara de combustión se abre, a su debido tiempo, la válvula de aspiración para permitir la entrada de la mezcla gaseosa de combustible con aire. La válvula comienza a abrirse antes de iniciarse la carrera y se cierra después de completarse la carrera. [11]
- Una vez finalizado el proceso de admisión, le sigue la **compresión**, en ella, tras ser cerrada la válvula de aspiración durante la carrera de retorno del pistón, la carga es comprimida en la cámara de combustión hasta un valor máximo, que se alcanza al final de dicha carrera. Así pues, en ese instante, el volumen de la carga queda reducido a una fracción del volumen que tenía al principio de la carrera. Dicha fracción es la inversa de la relación volumétrica de compresión. [11]
- Así pues, la siguiente fase que prosigue es la **combustión** y la **expansión**, poco después del final de la carrera de compresión, se produce el encendido de la mezcla por medio de una chispa eléctrica por medio de una bujía, este suceso, genera un aumento de la temperatura y de presión que es debido al calor emitido por el proceso de la combustión. El valor alcanzado por la presión después del encendido es, aproximadamente, unas 2 o 4 veces de la presión inicial, estas nuevas condiciones de alta presión provocan que el pistón sea desplazado hacia abajo. Antes de de que la carrera de trabajo se complete, comienza a abrirse la válvula de escape y los gases de combustión, que aún se encuentran a cierta presión, empiezan a salir del motor. [11]
- Y finalmente, la última fase corresponde al **escape**, durante esta etapa de retorno hacia el PMS, el pistón termina de expulsar los gases de combustión a través de la válvula de escape. [11]

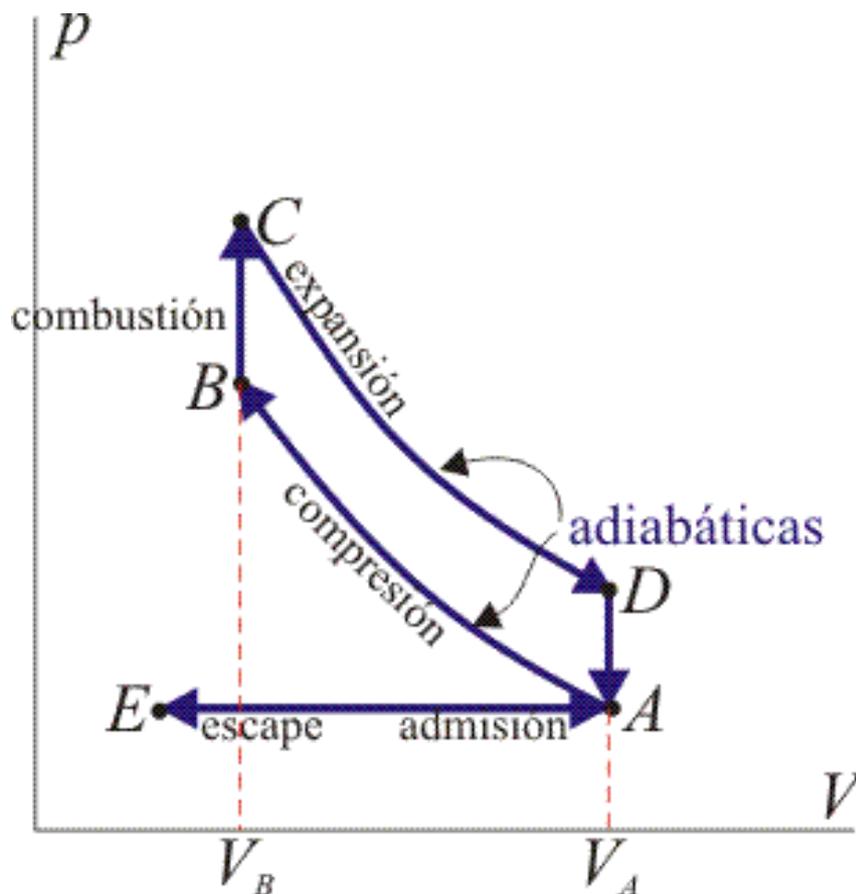


Figura 3-2. Diagrama p – V del ciclo termodinámico del motor a 4 tiempos [12]

Con respecto al empleo de este motor, presenta una serie de ventajas cuando, en vez de emplear gasolina, lo alimentamos con hidrógeno. Permite un rendimiento volumétrico máximo, debido a su elevado octanaje y su óptima combustión controlada, genera unos gases de escape no contaminantes para el entorno ambiental. Así pues, a través de una ligera adaptación tecnológica de este tipo de motor y aplicando una gestión controlada de la combustión, es posible obtener un motor de hidrógeno con un rendimiento energético similar o incluso superior en prestaciones potenciales al motor convencional de gasolina, así como en la autonomía de la conducción y, además, con un valor añadido en el aspecto ecológico. [6]

Como aplicación práctica de este motor, se encuentra el BMW 750 hL. Se lanzó al mercado en el año 2000 y fue el primer automóvil impulsado a hidrógeno fabricado en serie en todo el mundo. El vehículo va equipado con un motor ambivalente de doce cilindros propulsado a hidrógeno y gasolina. Rinde una potencia de 204 CV, y tiene una aceleración de 0 a 100 km/h en 9,6 segundos, alcanzando una velocidad máxima de 226 km/h. cuando el motor es alimentado con hidrógeno, el vehículo dispone de una autonomía de unos 350 kilómetros, gracias a los 140 litros de capacidad de su tanque criogénico en el que se almacena el hidrógeno. [13]



Figura 3-3. BMW 750 hL [14]

Si llegara a agotarse el hidrógeno y no hubiera una estación de servicio cercana, el vehículo cambiaría automáticamente al sistema de combustión convencional, utilizando gasolina como combustible, almacenada en un segundo tanque, y que le proporcionaría unos cientos de kilómetros de autonomía adicionales. La única diferencia, en el ámbito de la aspiración, respecto al motor convencional de gasolina del mismo modelo, es la adopción de válvulas adicionales para la admisión del hidrógeno. [13]

Tabla 3-1. Comparativa del modelo convencional con el de hidrógeno [13]

<b>Motor</b>	BMW 750 iL	BMW 750 hL
Combustible	Gasolina súper	Hidrógeno
Nº y disposición de cilindros	12 en V	12 en V
Válvulas por cilindro	2	2
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	5379	5379
Potencia máxima (CV/rpm)	243	204
<b>Rendimiento</b>		
Velocidad máxima (km/h)	250	226
Aceleración 0 – 100 km/h (segundos)	6.8	9.6
Aceleración 0 – 1000 m (segundos)	26.7	26.1

### 3.1.2 Motor Wankel

Este motor, a diferencia de uno de tipo alternativo, ejecuta las cuatro fases del ciclo en distintas zonas de la carcasa (estátor). Dentro de ella, se encuentra el rotor, el cual tiene forma de prisma rectangular de caras convexas y el cual se encuentra realizando un giro de centro variable. Dicho movimiento de rotación se transmite al cigüeñal donde finalmente esa energía mecánica se ve traducida en el movimiento del propio vehículo. [15]

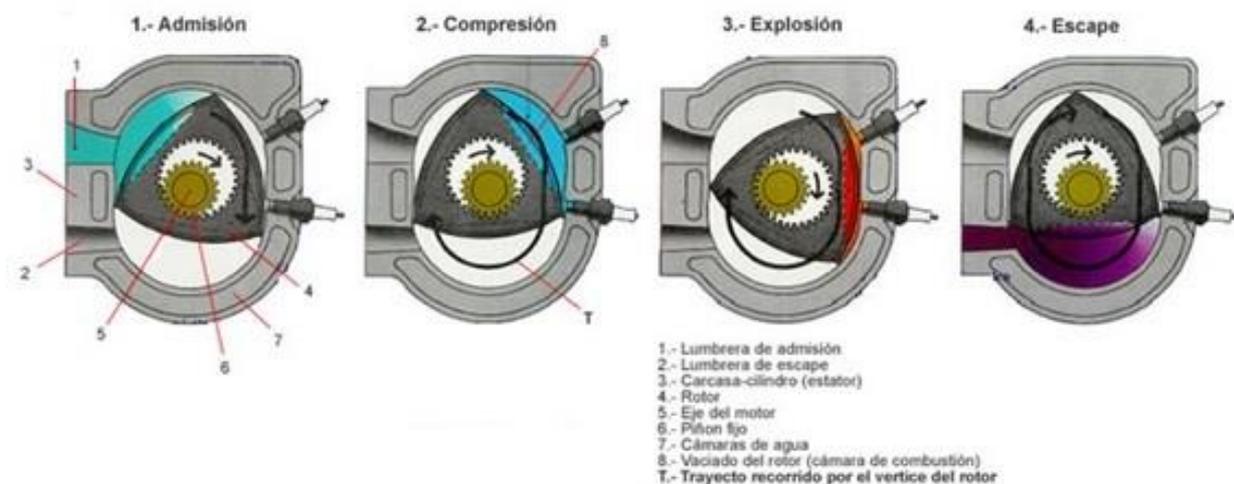


Figura 3-4. Fases del ciclo del motor Wankel. [16]

Las etapas en las que se produce un ciclo en el motor Wankel son las siguientes:

- **Admisión:**

La fase de admisión del ciclo empieza cuando el vértice del rotor descubre la lumbrera de admisión. En este momento el volumen de la cámara de combustión es mínimo. A medida que el rotor avanza, el volumen de la cámara de combustión aumenta absorbiendo la mezcla de aire-combustible. Cuando el otro vértice de la cara del rotor ha pasado por la lumbrera de admisión el volumen contenido queda aislado y empieza la compresión. [15]

- **Compresión:**

A medida que el rotor continúa su movimiento dentro del bloque, el volumen contenido en la cámara de combustión se hace cada vez más pequeño y la mezcla aire combustible se comprime. En el momento en que la cara del rotor queda enfrente de las bujías, el volumen de la cámara es mínimo. En este punto se produce el salto de la chispa y la consiguiente combustión de la mezcla. Ya que en la fase de compresión la cara del rotor se ciñe a la pared del estátor, la compresión sería excesiva si no se practicasen unas hendiduras sobre las caras del rotor. Estas hendiduras forman las cámaras de combustión del rotor. No obstante, estas cavidades presentan un inconveniente: se produce una comunicación de los conductos de admisión y escape (semejante al de los motores de dos tiempos alternativos). A pesar de todo, las relaciones de compresión con las que se trabaja habitualmente van desde 8:1 hasta 9,5:1. Para esta última parece obtenerse el consumo mínimo. [15]

- **Combustión y expansión:**

La mayoría de los motores rotativos tienen dos bujías. La cámara de combustión es larga, así que la llama se inflamaría demasiado lentamente si hubiera solamente una bujía. Cuando las chispas encienden la mezcla de aire-combustible, la presión aumenta rápidamente, forzando el rotor a moverse en la dirección en la que el volumen del compartimiento crece. Los gases de combustión continúan expandiéndose, moviendo el rotor y transformando energía, hasta que el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape. [15]

- **Escape:**

Una vez el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape, los gases de la combustión pueden escapar. A medida que el rotor se mueve, el volumen va disminuyendo forzando así la salida de los gases. En el momento en que el volumen del compartimiento es mínimo, el vértice del rotor vuelve a descubrir la lumbrera de admisión repitiéndose otra vez el ciclo. [15]

En cuanto a su aplicación particular de motor alimentado por hidrógeno, el motor Wankel puede aprovechar la elevada temperatura de ignición del hidrógeno. Se está investigando la posibilidad de incluir agua pulverizada en la mezcla de entrada, la cual se evaporaría al quemarse el hidrógeno, llegando a ejercer presiones muy altas de forma elástica, a diferencia de lo que ocurre en el pistón, en el cual se daría una detonación.

Otra ventaja más de este motor radica en su relación potencia/peso, ya que este motor puede llegar a desarrollar altas potencias en comparación con su tamaño, lo que permite tener un sistema motriz de alta potencia sin emisiones y de reducido tamaño. La compañía Reg Technologies ha conseguido una relación potencia/peso cerca de los 0,34 kg/CV, una cantidad muy reducida si la comparamos con los 2,72 kg/CV que presenta el motor de cuatro tiempos (de pistón). [13]



Figura 3-5. RX-8 Hydrogen RE [17]

Como aplicación de este motor en el sector automovilístico, se destaca el modelo RX-8 Hydrogen RE de Mazda, funcionando con gasolina, el Mazda RX-8 Hydrogen RE desarrolla una potencia de 210 CV y un par máximo de 222 Nm, siendo capaz de recorrer 550 kilómetros gracias a su depósito de gasolina de 61 litros. Si se cambia el modo de funcionamiento del motor para que pase a consumir hidrógeno, éste desarrollará una potencia de 109 CV y un par de 140 Nm, valores inferiores a los obtenidos con gasolina, aunque suficientes como para permitir circular con suficiente agilidad. Su tanque de hidrógeno de 110 litros le da una autonomía

adicional de 100 kilómetros, por lo que, en total, el deportivo puede recorrer 650 kilómetros llevando sus dos tanques de combustible llenos. [13]

### 3.2 Vehículos eléctricos de pila de combustible

Como ya se ha explicado previamente, el corazón de este tipo de vehículo es la pila de combustible, a continuación, se explicará el funcionamiento del FCEV como conjunto global, además, se observará las distintas diferencias características con respecto al vehículo tradicional de combustión interna.

Así pues, como componentes principales que conforman el FCEV, se encuentran, como se ha dicho anteriormente, la pila de combustible, los tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, en la zona delantera del vehículo, se encuentra el radiador cuya función es la de refrigerar el sistema, el motor eléctrico, la unidad de control de potencia, el convertidor DC/DC, un inversor AC/DC por último, las baterías eléctricas.

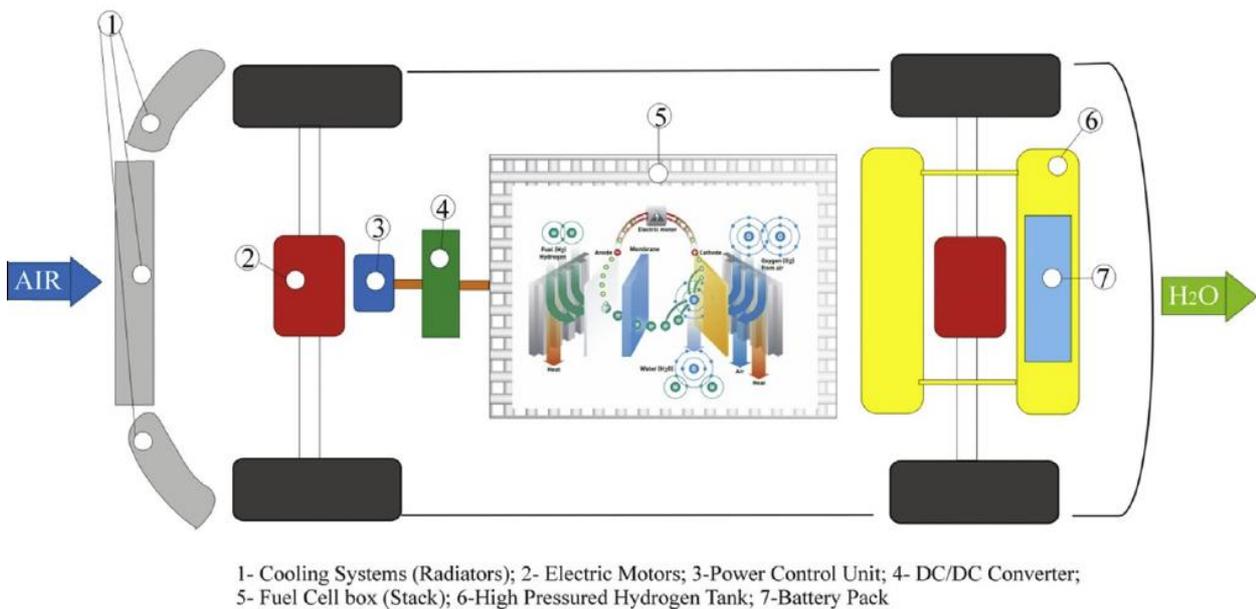


Figura 3-6. Diagrama de equipos del FCEV [18]

El hidrógeno almacenado en el vehículo se encuentra en el interior de los tanques a alta presión, cuando se produce una demanda de energía mecánica por parte del vehículo, los tanques de almacenamiento inyectan un caudal de hidrógeno hacia la pila de hidrógeno en donde se genera una corriente eléctrica, esta electricidad generada por parte de la FC es de tipo corriente continua, por lo que, para poder alimentar al motor eléctrico, requiere que sea transformada en forma de corriente alterna por medio de un inversor, si por condiciones y necesidades del motor, se produce más corriente eléctrica de la requerida, el excedente es almacenado en la batería eléctrica, dicha energía es posible utilizarla en otro momento.

Por otro lado, si en el funcionamiento del vehículo se comienza a decelerar la velocidad de este, entra a funcionar el freno regenerativo, al ser el motor de este vehículo una máquina eléctrica, puede funcionar tanto como motor y también como generador, en este último modo, la máquina eléctrica permite transformar el excedente de energía mecánica del vehículo y transformarla en energía eléctrica que será almacenada en la batería. En un vehículo convencional, esta energía mecánica que deja de ser necesaria se disipa en forma de calor por medio de los frenos que actúan sobre las ruedas.

Como ejemplo de un vehículo que se base en esta tecnología está el Hyundai Nexo, es un modelo tipo SUV, el cual contiene los elementos básicos de un FCEV, como elemento principal tiene una pila de combustible de tipo PEMFC que genera la corriente que alimenta al motor eléctrico de imanes permanentes que se encarga de producir la energía mecánica que requiere el vehículo, así pues, viene acompañado de un sistema de baterías de litio que permite almacenar la energía eléctrica que se produce debida al freno regenerativo, el hidrógeno que se emplea para alimentar a la pila de combustible, se encuentra almacenado en tanques a alta presión (700 bares). [19]



Figura 3-7. Hyundai Nexo [19]

Así pues, en la siguiente tabla se recogen las principales características de este vehículo.

Tabla 3-2. Prestaciones del Hyundai Nexo [19]

Prestaciones	Hyundai Nexo
<b>Motor</b>	
Potencia máxima	120 kW (160,92 CV)
Par máximo	395 Nm
Velocidad máxima (km/h)	179
Aceleración 0 – 100 km/h (segundos)	9.2
Aceleración 80 – 120 km/h (segundos)	7.4
<b>Batería</b>	
Potencia de salida total	135 kW
Potencia de salida de la batería	40 kW
Potencia de salida de la FC	95 kW

### 3.3 Situación actual y perspectivas a futuro

Actualmente, la tendencia en el sector automovilístico es más favorable a la inclusión del vehículo de pila de combustible (FCEV), en parte gracias a la cada vez mayor implantación del vehículo eléctrico de batería (BEV). De entre los distintos tipos de vehículos, es el automóvil el que tiene mayor implantación con respecto a la tecnología de la pila de combustible. En 2018, se estima que se vendieron unos 4000 vehículos de esta tipología, consiguiendo un total de 11 200 unidades en funcionamiento. En comparación con el BEV, es aún una cifra muy baja, ya que existe unos 5,1 millones. La proporción es aún más baja con respecto al parque móvil total, situada en torno al billón de vehículos. [4]

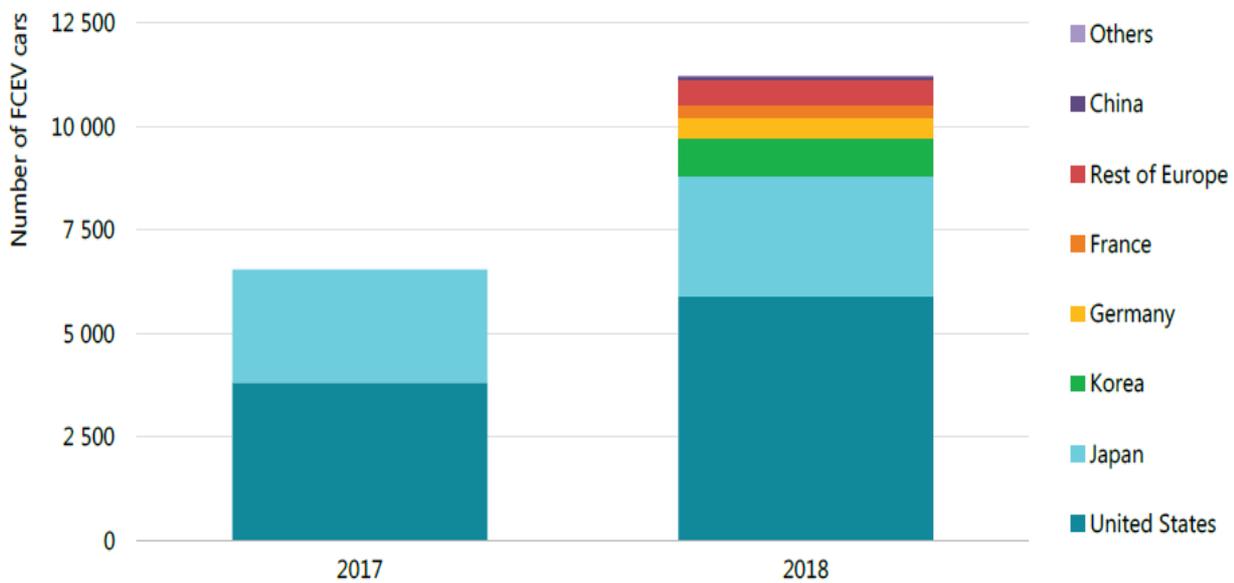


Figura 3-8. Evolución del número de FCEV por países [4]

Centrándonos ahora con respecto al FCEV por países, como se puede observar en la gráfica, Estados Unidos lidera el ranking con aproximadamente la mitad del número total de FCEV, seguido de Japón con un 25%, la Unión Europea, con Alemania y Francia a la cabeza, representando un 11% y seguido de Corea del Sur con un 8%. Así pues, como principales fabricantes de este tipo de vehículo, destacan Toyota, Honda y Hyundai. [4]

Por otro lado, si estudiamos el caso de los autobuses en funcionamiento bajo esta tecnología, China lidera esta categoría con un total de 400 a fecha de finales de 2018 y se espera que para el fin del año 2020 alcance en torno a 1000 autobuses en uso, le sigue a su vez la Europa, la cual se estima que tiene en funcionamiento unos 50 autobuses (2017), por parte de EE.UU, el estado de California es el que más apostado en el autobús de hidrógeno con un total de 25, estimándose en 30 para el resto del país. [4]

La pila de combustible aplicada para el transporte público, como es el caso de los autobuses, es una opción muy interesante para aplicar esta tecnología, debido a su buena autonomía permite no realizar repostaje durante el día, por lo que hace que estos vehículos estén bien preparados para recorridos medios, del orden de 200 km, como puede ser el caso de los autobuses interurbanos [4]

## 4 PROYECTOS EN MARCHA

En este capítulo vamos a describir los principales proyectos que se están llevando a cabo que tienen especial relevancia, como hemos visto, el vehículo basado en la tecnología del hidrógeno va a tener una tendencia alcista en los próximos años, con el fin de contribuir a una progresiva descarbonización de la economía, es por ello, que es imprescindible una red adecuada de estaciones de servicio de hidrógeno que sea capaz de abastecer esta creciente demanda en el sector del transporte. Así pues, dividiremos los proyectos en conjuntos, en primer lugar, se expondrán los que se están realizando en el ámbito europeo y a continuación, se explicarán los trabajos que se están ejecutando a nivel nacional.

### 4.1 Proyectos a nivel europeo

#### 4.1.1 Hydrogen for Innovative Vehicles (HyFIVE)

El proyecto denominado como Hydrogen for Innovative Vehicles (HyFIVE), con la colaboración y participación de un total de 15 socios, se plantearán desplegar una flota de vehículos de pila de combustible. Entre los colaboradores de este proyecto, se encuentran los fabricantes más importantes de vehículos de hidrógeno. [20]



Figura 4-1. Consorcio de empresas de HyFIVE [20]

Para ello, será necesario crear una red de abastecimiento de hidrógeno la cual permita una suficiente autonomía a la hora de emplear dichos vehículos. En donde se aspira a construir un total de 6 estaciones, las cuales estarán situadas en el Norte de Italia, Austria, Alemania, Dinamarca, Noruega y el Reino Unido. Gracias a este proyecto, se busca conseguir una mejora en la calidad del aire en las poblaciones, en especial las grandes áreas urbanas, ya que son las que sufren unos mayores niveles de contaminación. [20]



Figura 4-2. Localización de las HRS del proyecto HyFIVE [20]

#### 4.1.2 Hydrogen Mobility Europe (H<sub>2</sub>ME)

El proyecto H<sub>2</sub>ME pretende crear, como objetivo principal, una gran red europea de estaciones de servicio de hidrógeno que permita cubrir la futura demanda de este combustible, esta nueva red de hidrogeneras tendrá lugar en Alemania, Francia, los Países Escandinavos, Reino Unido y los Países Bajos. Dicho proyecto, está dividido en dos fases, denominados como H<sub>2</sub>ME1 y H<sub>2</sub>ME. [21]

## H2ME initiative (2015 – 2022)

### Project overview

HRS: Hydrogen Refuelling Station  
 FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle  
 RE-EV: Range-Extended Electric Vehicle



#### New hydrogen refuelling stations:

- ❖ 20 - 700bar HRS in Germany
- ❖ 10 - 350bar and 700bar HRS in France
- ❖ 10 - 700bar HRS in Scandinavia
- ❖ 6 - 350bar and 700bar HRS in the UK
- ❖ 1 - 700bar HRS in NL

#### Fuel cell vehicles:

- ❖ 500 OEM\* FCEVs
- ❖ 900 fuel cell RE-EV vans

#### Hydrogen rollout areas:

- ❖ Scandinavia, Germany, France, UK, The Netherlands

#### Observer coalitions:

- ❖ Belgium and Luxembourg

#### Industry observer partners:

- ❖ Audi, BMW, Nissan, Renault, Renault Trucks, OMV



Proposed HRS locations under H2ME-1 (yellow dot)  
 Proposed HRS locations under H2ME-2 (orange dot)

\*OEM refers to original equipment manufacturer

Figura 4-3. . Localización de las HRS del proyecto H2ME [21]

En la primera parte de este proyecto, el H<sub>2</sub>ME1, el cual comenzó en el año 2015 y se prevé que finaliza a mediados de 2020, creará durante estos 5 años un total de 29 estaciones de recarga y, por otro lado, fomentará el aumento del número de FCEV en unos 300. Así pues, en paralelo a esta primera fase del proyecto, se ejecutará el H<sub>2</sub>ME2, se inició en mayo del 2016 y terminará en el año 2022, durante este periodo, se llevará a cabo la construcción de otras 20 estaciones de servicio de hidrógeno y se llevarán a cabo una serie de medidas para estimular el aumento de la flota de vehículos de hidrógeno, tanto en automóviles, furgonetas y camiones, hasta alcanzar finalmente los 1100. [21]

Centrándonos en los aspectos técnicos de las hidrogeneras, éstas permiten tiempos de repostajes similares a los vehículos convencionales, en aproximadamente 3 o 5 minutos, es posible finalizar el proceso de recarga del vehículo. Así pues, las estaciones de servicios de hidrógeno que se llevarán a cabo en el proyecto H<sub>2</sub>ME están basadas en la siguiente tecnología: [21]

- **HRS de optimización y equilibrio de la red:** este tipo de instalaciones se diseñarán basándose en sistemas de control inteligentes que ayuden y permitan una mayor estabilidad de la red eléctrica, además se incluirán estrategias para lograr una mejor optimización del precio de la electricidad. [21]



Figura 4-4. Diagrama de una HRS de optimización y equilibrio de la red [21]

- **Estación de suministro de hidrógeno con generación “off-site”:** este tipo de hidrogenera tiene un tipo análogo de funcionamiento que una gasolinera tradicional, la producción del hidrógeno es descentralizada y es transportado a posteriori mediante camiones cisterna a la estación de servicio de hidrógeno. Como principal ventaja que tienen, es su mayor facilidad de integración, además de su menor coste de funcionamiento. [21]

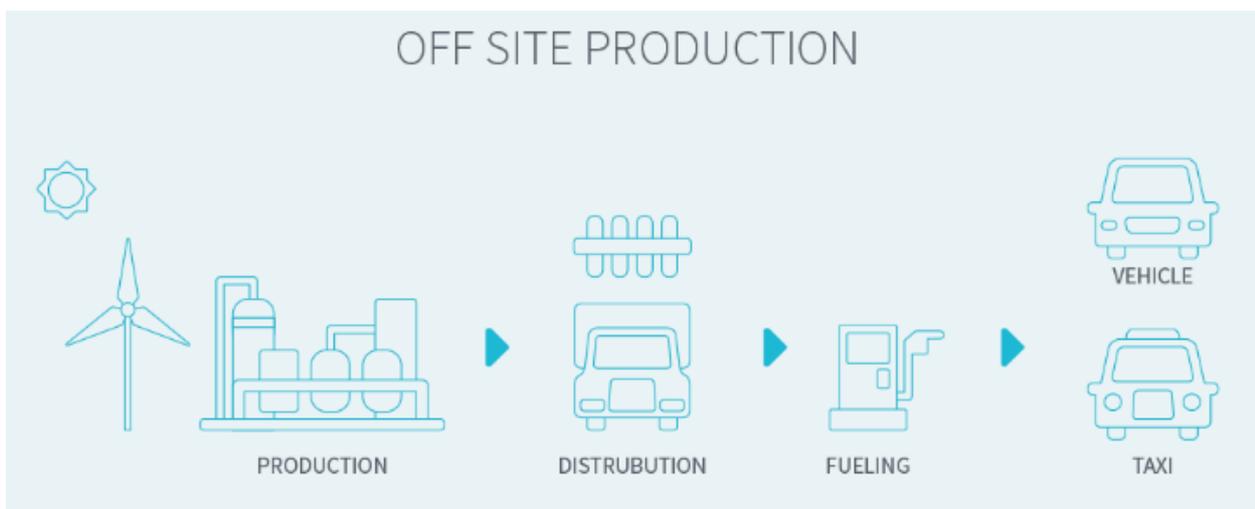


Figura 4-5. Diagrama de una HRS de producción “off site” [21]

- **Estación de suministro de hidrógeno con generación “on-site”:** a diferencia del caso anteriormente explicado, la producción del hidrógeno es en la misma instalación de suministro, en el caso particular de este proyecto, se promueve la creación de hidrogeneras que aprovechan excedentes de electricidad procedente de energía renovable y a través de un proceso de electrólisis, se obtiene el hidrógeno. Así pues, como principales ventajas encontramos que se emplea un combustible limpio desde su creación, además de que se ahorra el proceso de transporte y distribución del hidrógeno puesto que es generado in situ. [21]



Figura 4-6. Diagrama de una HRS de producción “on site” [21]

En este momento actual, tanto los vehículos de pila de combustibles como la infraestructura asociada a los puntos de recarga están en una situación de introducción al mercado. Por lo tanto, el objetivo principal del proyecto es que a partir de las instituciones europeas se cree esta red de hidrogeneras transnacional la cual fomentará la entrada progresiva del FCEV en la sociedad. Como consecuencia a esta tesis, se espera, durante los primeros años del proyecto, un crecimiento lento de dicha infraestructura a medida que se consiga estimular la demanda de estos vehículos. [21]

Para obtener una cobertura adecuada de hidrógeno se estima que se requiere una red de hidrogeneras del orden de 100 estaciones por país, las cuales se debería alcanzar en otros proyectos a futuro. Así pues, los costes de inversión de las estaciones de servicio de hidrógeno se mantendrán altos los primeros años, lo cual van a necesitar el amparo de las instituciones para que pueda hacerse un hueco en el mercado dicha tecnología. Sin embargo, se espera que para el año 2025, se alcance una madurez tecnológica suficiente que permita por sus propios medios autosostenerse. [21]

## 4.2 Proyectos a nivel nacional

### 4.2.1 Corredor de Hidrógeno para la Región Pirenaica (H2piyR)

Este proyecto va a poner los cimientos para la entrada del vehículo de hidrógeno en España, va a crear las conexiones e infraestructuras necesarias para poder establecer un corredor transfronterizo de las estaciones de servicio de hidrógeno que conecte las comunidades autónomas de Aragón y Cataluña con los departamentos franceses del suroeste y que finalmente llegue hasta el centro y norte de Europa, donde hemos visto en los anteriores proyectos, se está apostando fuertemente por la tecnología del hidrógeno aplicada al transporte. [22]

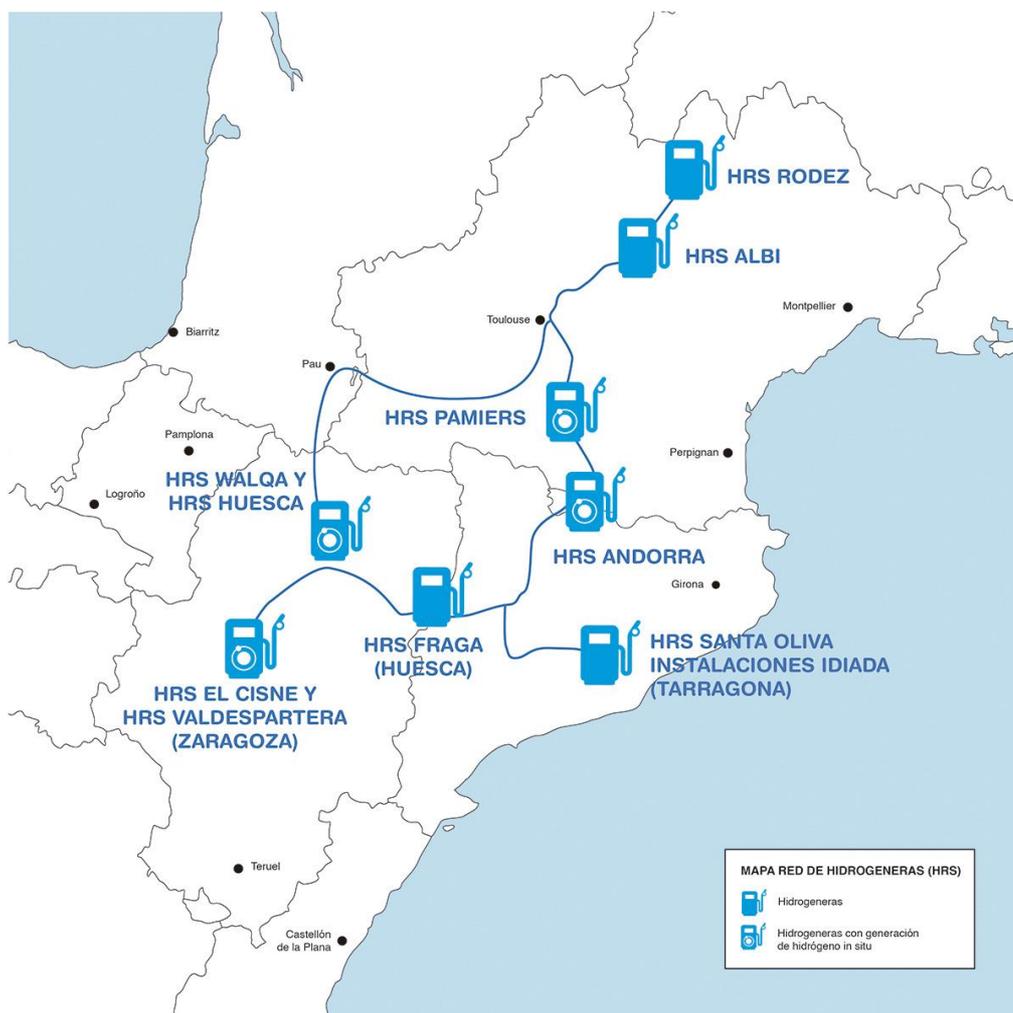


Figura 4-7. Localización de las HRS del proyecto H2piyR [22]

Este proyecto se engloba dentro del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020) el cual, entre otros objetivos, se encuentra el de generar tecnologías innovadoras en materia de recursos naturales que sean fruto gracias al desarrollo de planes de cooperación.

El proyecto está formado por un consorcio en el cual participan empresas privadas como Applus, H<sub>2</sub> Impulsion, entre otras, además de organismos públicos como el Ayuntamiento de Huesca, la Región de Occitania... El presupuesto con el que cuenta este proyecto es de un total de 1,6 millones de euros, de los cuales el 65% procede del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Comenzará el 1 de julio de 2016 y se prevé que finalice el 30 de junio de 2021. [22]



Figura 4-8. Consorcio de empresas del H2piyR [14]

Así pues, entre las medidas a ejecutar, se crearán 6 nuevas estaciones de servicio de hidrógeno situadas estratégicamente en Zaragoza, Huesca, Fraga y Tarragona, para finalmente contar con 10 hidrogeneras, contando con las ya existentes. Además, también será una forma de estimular las economías locales y facilitará la innovación en tecnologías del hidrógeno en todas las áreas que puedan aportar a la construcción y puesta en marcha del corredor. También, además de la infraestructura desplegada, se espera desplegar una flota de unos 16 vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno, que serán 6 turismos, 8 furgonetas y 2 autobuses. [22]

#### 4.2.2 Hydrogen corridors (H2C)

Este proyecto tiene como principal objetivo el desarrollar prototipos de ferrocarriles de vía estrecha y, a través de una serie de ensayos, poder conocer la viabilidad técnica del uso de estos trenes que emplean el hidrógeno como fuente de energía. Así pues, con la aplicación de este sistema a nivel generalizado, se podría reducir el 100% de las emisiones directas si se compara por otro que, en su caso, emplee combustibles fósiles, otro objetivo fijado a alcanzar es la obtención de al menos un 70% de energía de origen renovable. [23]



Figura 4-9. Tren del proyecto H2C [23]

Este proyecto se encuentra en manos de un ente público-privado, en donde participa Enagás, Renfe, Bureau Veritas y Audigna. Esta iniciativa, a su vez, se encuentra dentro del programa LIFE de la Unión Europea, el cual es el instrumento financiero europeo que trabaja sobre el medio ambiente el cual se encuentra operativo desde el año 2014 hasta el 2020. Además, dicho proyecto también incluye la puesta en marcha de una red de estaciones de servicio de hidrógeno. [23]

## 5 ASPECTOS GENERALES DE LAS HRS

La tecnología del hidrógeno basada en las estaciones de servicio de hidrógeno está alcanzando mayor relevancia en los últimos años. Actualmente, a fecha de 2018, en total hay 381 hidrogeneras, en donde los países que más han apostado por esta tecnología son Japón, con un total de 100, le sigue Alemania con 69 hidrogeneras y finalmente se encuentra los Estados Unidos con 63 puntos de recarga tal y como se puede observar en la gráfica.

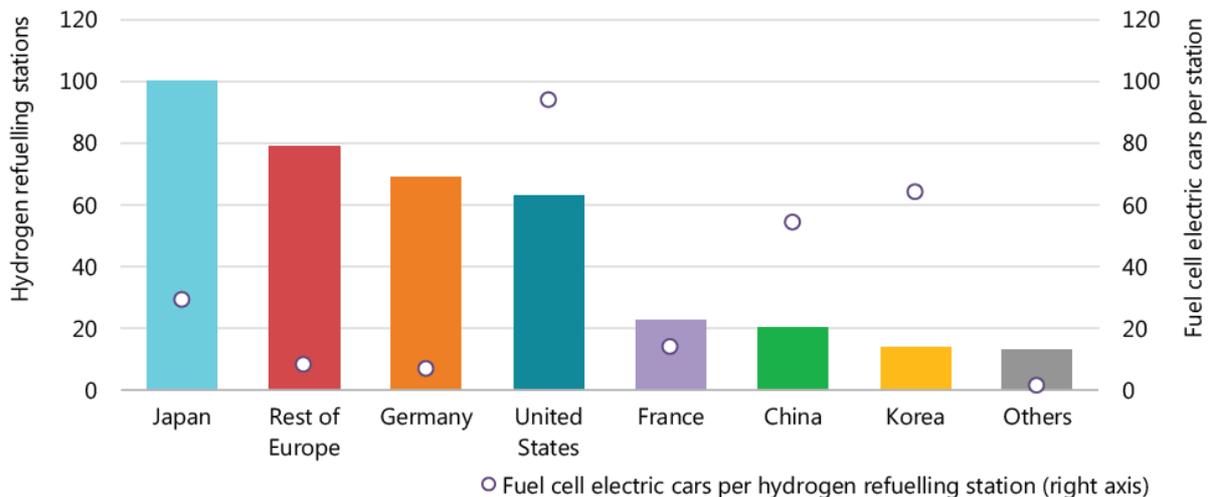


Figura 5-1. Diagrama de barras de HRS con respecto al nº de FCEV por estación

Si comparamos estos datos con los que ofrece la tecnología del vehículo eléctrico, la cual es actualmente la alternativa más sólida para el vehículo de combustión interna, está en clara desventaja. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía, existe unos 144.000 puntos de recarga rápida y para el caso de los puntos de recarga lenta, hay en total unos 395.000 y existe unos 4,7 millones de cargadores de uso privado.

Una de las grandes dificultades a las que se afronta las estaciones de servicios de hidrógeno, es la alta dependencia del precio del hidrógeno con respecto al nivel de uso de la propia hidrogenera. Por tanto, con una mejor relación de vehículos por número de estaciones de suministro de hidrógeno, se lograría reducir el precio del hidrógeno el cual ronda entre los 15-25 \$/kg H<sub>2</sub>, sabiendo que los tanques de almacenamiento de hidrógeno de un FCEV suelen soportar unos 5 kg, el llenado completo del automóvil supondría del orden de 125\$ en el peor de los casos.

Así pues, centrándonos a continuación en el aspecto constructivo de la instalación, se puede realizar la siguiente clasificación, se definen tres grandes grupos en función del origen del hidrógeno que se va a tratar en la hidrogenera [24]

- HRS de generación off-site: el hidrógeno es producido en instalaciones industriales, por lo tanto, es necesario transportarlo hasta las estaciones de servicio, ya sea a través de una red de tuberías o bien por carretera mediante camiones.
- HRS de generación on-site: en este tipo de hidrogenera, el hidrógeno es producido en las propias instalaciones, ya sea por medio de la electrolisis o por el reformado de combustibles
- Por último, también cabe la posibilidad de instalar un reformador en el vehículo, por lo que la producción de hidrógeno se lleva a cabo en su interior (on board)

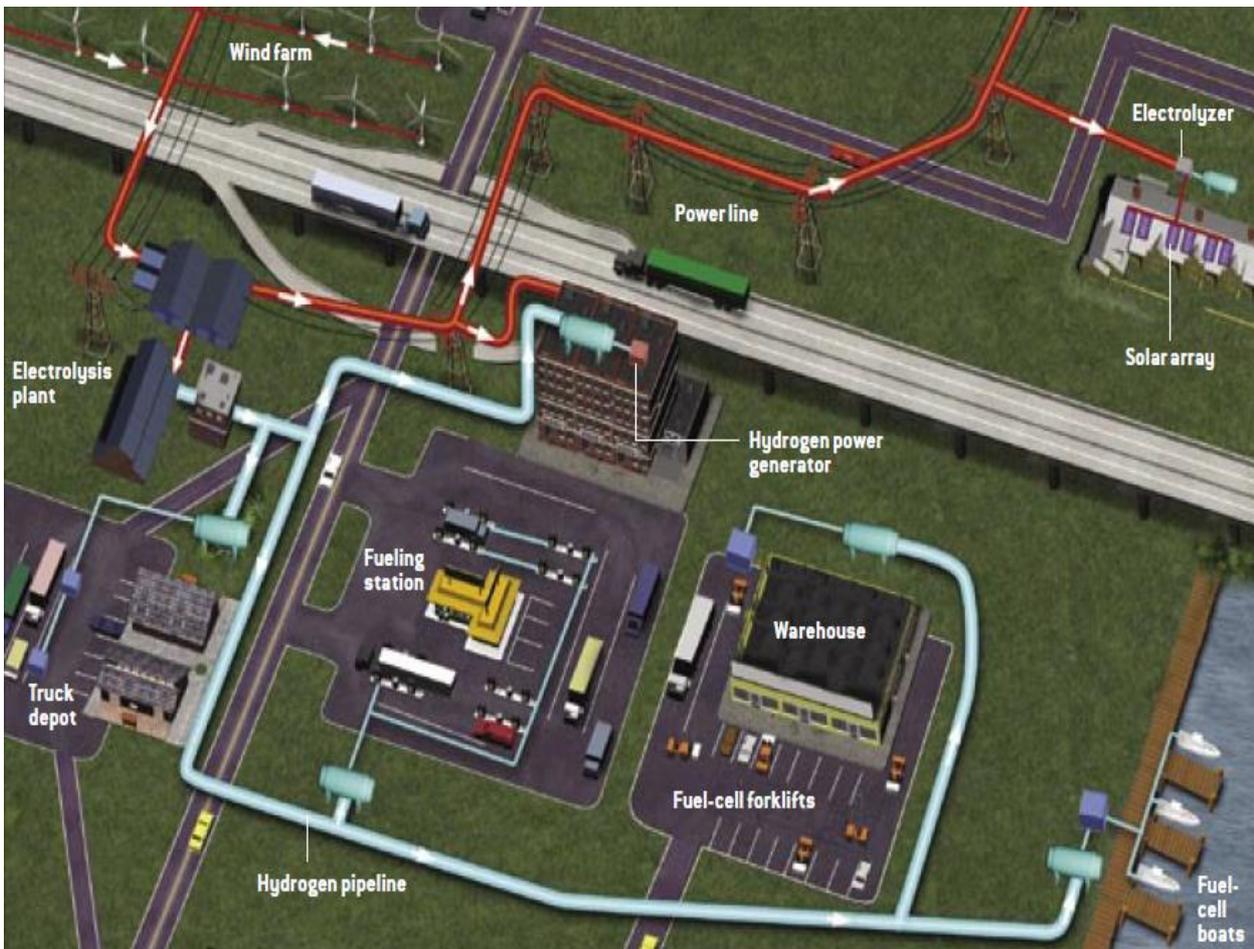


Figura 5-2. Vista general de una estación de suministro de hidrógeno [25]

Así pues, como se puede observar en la Tabla 5-1, la opción que más predomina en cuanto al tipo de producción es la centralizada, con un total de 45% respecto al total, a destacar también que dentro de la generación de hidrógeno por electrolisis (37%), la que más prevalece es la que tiene, como origen de la energía, la propia red eléctrica.

Tabla 5-1. Origen de la obtención del hidrógeno [24]

<b>Método de obtención del H<sub>2</sub></b>	<b>Estructura (%)</b>
<b>Producción centralizada y suministro (vía carretera o tuberías)</b>	<b>45</b>
<b>Eléctrolisis</b>	
-----	
- A partir de la red eléctrica	70
Producción distribuida	
- A partir de energía FV	14
- A partir de en. Eólica	14
- A partir de otras en. Renov.	2
-----	
<b>Reformado</b>	
	<b>18</b>
-----	
<b>Total</b>	<b>100</b>
-----	

En primer lugar, para poder explicar y clasificar los distintos tipos de hidrogenaras, se va a definir los distintos sistemas que intervienen y su funcionamiento general, el siguiente esquema representa de forma somera dichos sistemas, el cual puede variar el orden según la tecnología en la que se base su funcionamiento.

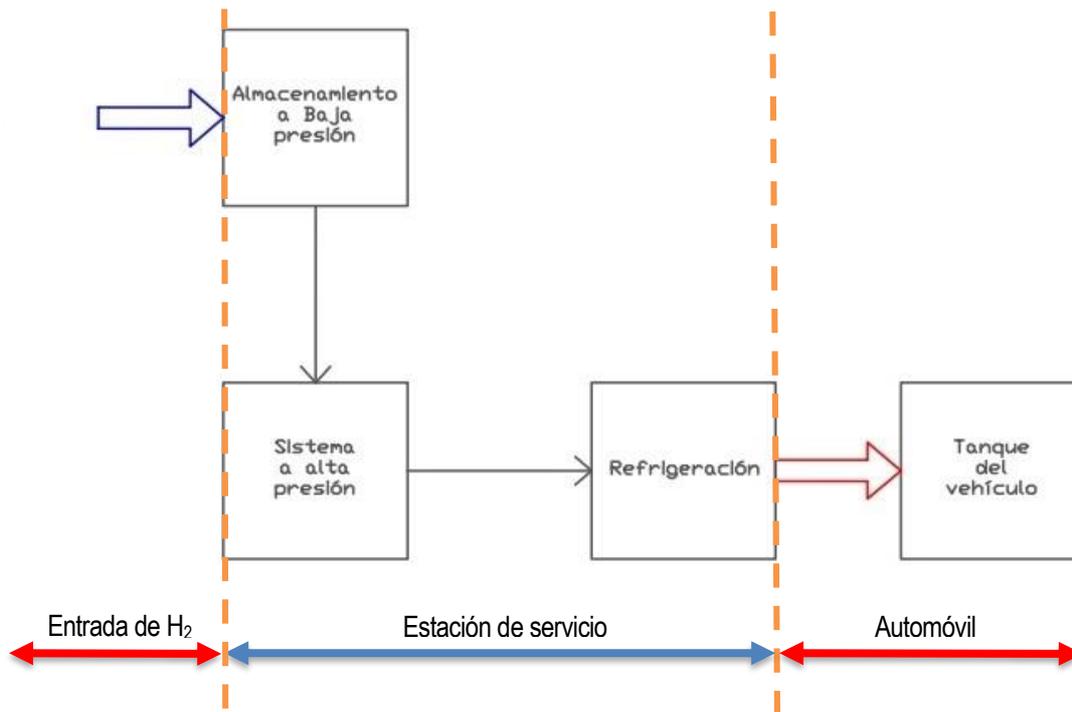


Figura 5-3. Esquema conceptual de los sistemas que intervienen en la HRS. Elaboración propia.

Como punto de partida, el hidrógeno, tanto si es generado in situ en la planta o si viene transportado, se deposita en primer lugar aplicando un almacenamiento a bajas presiones, la naturaleza de este almacenamiento dependerá del estado físico del hidrógeno, ya sea licuado o en forma de gas comprimido, esta particularidad determinará la configuración de los distintos elementos que conformen el sistema.

A continuación, es necesario aumentar la presión del hidrógeno a través de un sistema mecánico de compresión, debido a que la presión requerida para el tanque de almacenamiento de los vehículos se sitúa en torno a los 350-700 bar, dependiendo ya del tipo de vehículo, así pues, el hidrógeno pasa a un segundo [26] sistema de almacenamiento a altas presiones, en dicho sistema, según la tecnología que se aplique, tendrá una estructura u otra, tras la compresión del fluido, al no producirse de forma adiabática, es necesario evacuar dicho calor excesivo, para ello, se hará circular el caudal por un intercambiador de calor.

Cuando se produzca alguna demanda de consumo de combustible, el hidrógeno a alta presión se dirige a una válvula, ajustando la presión a las condiciones requeridas del tanque del vehículo a repostar, este salto de presión produce un aumento en la temperatura del caudal de hidrógeno, por lo que es necesario un sistema de refrigeración que capte el calor sobrante hasta alcanzar la temperatura para el proceso.

Finalmente, el caudal llega a los surtidores y a continuación al tanque del vehículo.

# 6 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

En la actualidad, el almacenamiento del hidrógeno continúa siendo un gran reto, debido a sus características físicas, como su baja densidad o su temperatura de evaporación, hace que estos depósitos tengan una serie de peculiaridades para subsanar dichos inconvenientes.

El hidrógeno, a pesar de que tenga unos valores de energía específica muy altos, su densidad es muy baja, además de su densidad de energía. Por lo tanto, para poder almacenar una gran masa de hidrógeno en un volumen determinado, es necesario aplicar muy altas presiones. [27]

Así pues, en este primer apartado, se va a analizar la forma a la que se almacena el hidrógeno en la estación de servicio. Las dos principales tecnologías aplicadas para este sistema son el almacenamiento del hidrógeno en estado líquido y el almacenamiento en estado gaseoso.

## 6.1 Almacenamiento en estado líquido

El almacenamiento del hidrógeno líquido presenta una gran problemática, como se ha mencionado anteriormente, su baja temperatura de ebullición, la cual se sitúa en 20 K, es por ello por lo que los tanques en los que se almacena tengan un aislamiento de muy baja conductividad, para evitar posibles evaporaciones en su interior debido a transferencias de calor desde el exterior. [28]

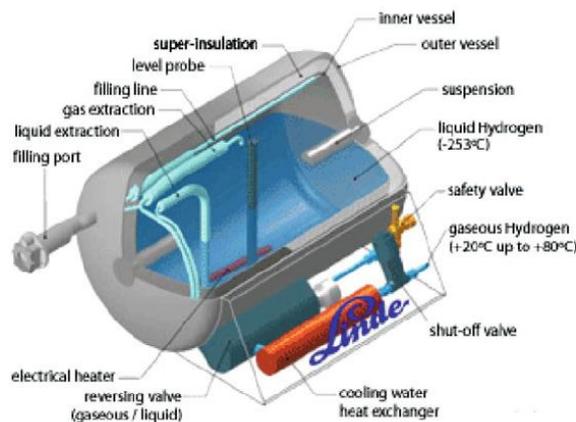


Figura 6-1. Tanque de hidrógeno líquido [29]

Así pues, estos tanques, para proteger al hidrógeno de la conducción y convección, el aislamiento del tanque se compone de una doble pared que se encuentran separadas por vacío. Para evitar las transferencias por radiación, se colocan entre unas 30 o 100 capas de baja emitanancia aplicando una película de Mylar, un material plástico, o también es aplicable la perlita (silicona coloidal). [28]

Para el LH<sub>2</sub>, se opta principalmente por dos tipos de depósitos, el esférico, el cual, ya que es el cuerpo geométrico que posee la menor superficie de transferencia por unidad de volumen. Esta propiedad permite dimensionar grandes depósitos de hidrógeno a la vez que se consigue reducir el efecto de transferencia de calor y evitaría en cierta medida la evaporación del hidrógeno en su interior. [28]

Otra configuración por la que se opta también es la cilíndrica, resulta más económico y fácil construirlos así que de forma esférica, además de que la proporción entre el volumen total del depósito y el área de transferencia es muy semejante a la esférica. [28]



Figura 6-2. Almacenamiento estacionario de hidrógeno líquido [29]

## 6.2 Almacenamiento en estado gaseoso

Habitualmente, para el almacenamiento del  $H_2$ , se emplea gas comprimido en cilindros metálicos. Para el caso particular de las HRS, se presuriza en etapas y se almacena en bancos de contenedores, en ella, se puede encontrar almacenado el hidrógeno a bajas presiones, del orden de 4.5 MPa, a presiones medias (20-50 MPa) hasta llegar a presiones altas, alcanzando valores de unos 70-100 MPa. Según la función que lleven a cabo en la hidrogenera, se optará de unos niveles u otros. [30]

Así pues, la principal problemática que tiene el almacenamiento del  $CGH_2$  es la gran cantidad de energía necesaria para la compresión, además de la tensión que han de soportar las paredes de los depósitos de almacenamiento, debidas principalmente a los ciclos de carga y descarga, en los que se producen gradientes de presión muy altos. [30]

Estos tanques además deben ser muy estancos, ya que existe una gran diferencia de presión entre el interior y el exterior del tanque, para evitar posibles fugas de hidrógeno, así pues, debido a su baja masa molecular, adquiere una gran difusividad lo cual hace necesario que las paredes de los tanques tengan un gran aislamiento. [30]

Todas estas características técnicas están normalizadas y establecidas por diversas organizaciones, como ASME, ISO... Así pues, según la aplicación para la que se vaya a llevar a cabo, se puede clasificar los tanques en los siguientes tipos: [30]

- Tipo I: fabricado en metal, recipiente metálico sin soldadura
- Tipo II: recipiente metálico sin costura envuelto en aro con compuesto de resina de fibra
- Tipo III: forros metálicos totalmente envueltos con compuesto de resina de fibra
- Tipo IV: forro polimérico completamente envuelto con resina de fibra compuesta.

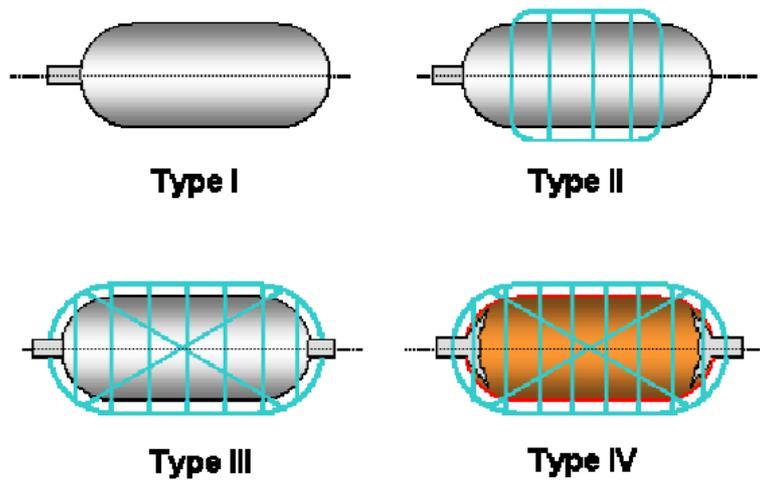


Figura 6-3. Clasificación de los tanques de almacenamiento de CGH<sub>2</sub> [29]

Los tanques de tipo I se caracterizan por ser muy pesados y con paredes gruesas y están fabricados de acero o aluminio. Se usan para almacenamientos a baja presión, son capaces de soportar hasta 25 MPa. Suele emplearse para aplicaciones móviles, como el caso de los vehículos de GNC, además de como opción para ciertas aplicaciones estacionarias. [30]



Figura 6-4. Tanques tipo I [31]

Por su parte, los de tipo II, también se caracterizan por ser muy pesados, soportan rangos de presión más altos que los de tipo I, del orden de 45-80 MPa. Su principal aplicación es como tanque de amortiguación en el sistema de alta presión de las HRS. [30]



Figura 6-5. Tanque tipo II [32]

Y finalmente, tanto los tanques tipo III y IV, son en general más ligeros y tienen paredes más delgadas en comparación de los de tipo I y II.

Los recipientes Tipo III con NWP (presión nominal de trabajo) de 35 MPa tienen revestimientos de aluminio sin costura o se encuentran soldados completamente envueltos con compuesto de resina de fibra. Y los de tipo IV tiene una NWP de 70 MPa, están hechos de revestimientos no metálicos (es decir, plásticos) en una matriz de fibra / epoxi. [30]



Figura 6-6. Tanque tipo III [33]

La fibra que envuelve el revestimiento polimérico proporciona el nivel de resistencia requerido para contener hidrógeno presurizado, mientras que el revestimiento actúa principalmente como barrera de permeación. Aunque estos cilindros son más ligeros que los que contienen revestimientos totalmente metálicos, son más caros. Su principal aplicación es para aplicaciones móviles. [30]



Figura 6-7. Tanque tipo IV [34]

# 7 SISTEMAS DE REPOSTAJE

En este capítulo, se va a explicar los procesos que se ejecutan desde que el hidrógeno se toma a baja presión hasta que llega se produce el repostaje del vehículo en cuestión. Para ello, se va a dividir la tecnología en dos grandes grupos, en función si el hidrógeno empleado de forma inicial es líquido o bien se emplea en forma de gas comprimido.

## 7.1 Sistemas de repostaje con almacenamiento de CGH<sub>2</sub>

En este apartado, se va a analizar las tecnologías que se aplican, existen actualmente 3, en primer lugar y el más empleado, el sistema de repostaje en cascada, además, también existe la opción de realizar una compresión directa con o sin un acumulador. Así pues, se analizará en qué consiste estas tres tecnologías y sus ventajas e inconvenientes que tienen cada una.

### 7.1.1 Sistema en cascada

En primer lugar, el vehículo se conecta a la estación, a continuación, el sistema de monitorización de la planta registra la presión y el tamaño del tanque, ya sea mandando un caudal másico al tanque y a continuación midiendo el aumento de presión o bien, a través de comunicación por infrarrojos entre el vehículo y la estación. [35]

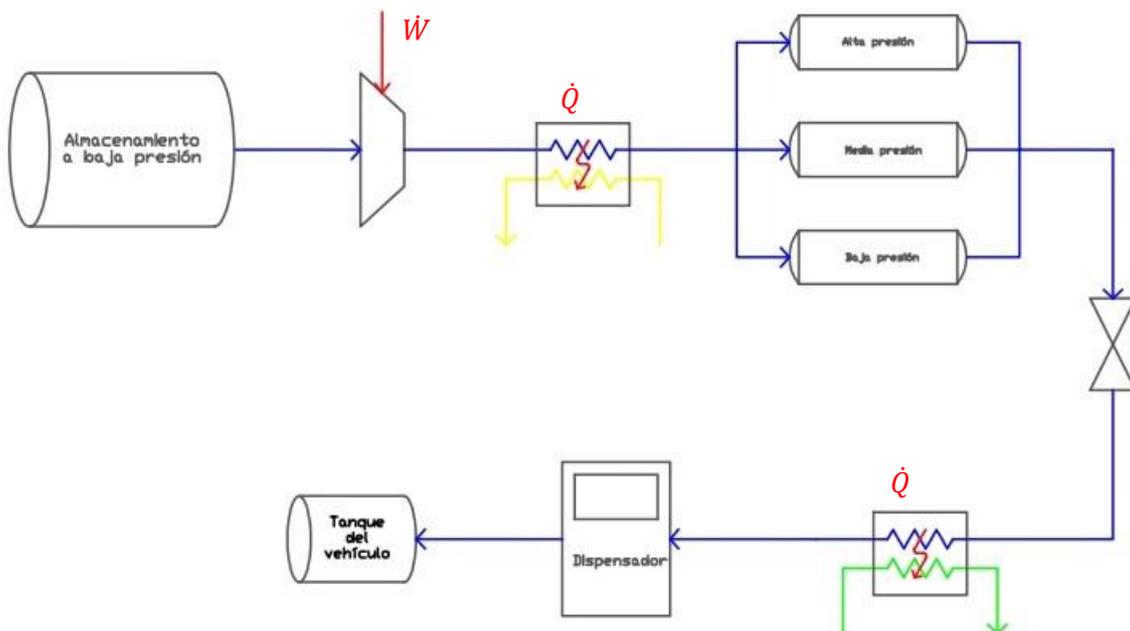


Figura 7-1. Esquema del sistema de repostaje en cascada. Elaboración propia.

Así pues, el sistema da la señal para que el tanque 1, el de menor presión (400 bares), se abra y genere un caudal de hidrógeno que fluya hasta el tanque del vehículo. Al mismo tiempo, el compresor arranca y manda hidrógeno a la corriente que converge con la que sale del tanque hasta llegar al mezclador. Si el flujo de masa del compresor es mayor que el necesario para el repostaje, el exceso de hidrógeno se almacena en el tanque. Cuando la presión a través de la válvula de reducción alcanza un cierto límite, el repostaje del tanque 1 cesa y comienza a surtir de hidrógeno el tanque 2, el cual está a mayor presión que el tanque 1 (675 bares). Previamente, el compresor llena el tanque 1 hasta la presión de arranque antes de comenzar a dirigir el caudal de hidrógeno hacia el mezclador que le corresponde al tanque 2. Se vuelve a proceder de la misma forma cuando se pasa del tanque 2 al 3. El cual corresponde al de mayor presión, del orden de 950 bares. [35]

Cuando el tanque del vehículo alcanza la presión objetivo, el proceso de carga finaliza. Sin embargo, el compresor sigue funcionando hasta que los tanques a alta presión vuelven a su masa y presión inicial.

Con todo ello, es necesario cumplir con las exigencias que se especifican en la SAE TIR J2601, norma de referencia en el repostaje de los vehículos de hidrógeno, la cual establece un índice de rampa de presión promedio (APRR) como se puede observar en la Figura 7-2, representa una recta de pendiente positiva que nos indica el ritmo al que progresivamente va aumentando la presión en el tanque del vehículo hasta finalizar el proceso de repostaje, fijando una presión final objetivo.

Como se puede apreciar en la curva azul, la cual mide la presión a la salida del sistema de llenado de cascada y previo a la entrada a la válvula de control, se muestran una serie de escalonamientos, los cuales son debido al momento en el que cesa el trabajo del tanque y a continuación, comienza a inyectar combustible el que es de mayor presión, tal y como se ha explicado previamente. Así pues, como referencia se tiene la APRR, en el momento en el que ambas rectas convergen, la azul con ésta, el tanque que se encuentra trabajando no es capaz de seguir suministrando hidrógeno ya que su presión se ha igualado con el tanque del vehículo, ese es el instante el que entra a actuar el siguiente tanque de mayor presión.

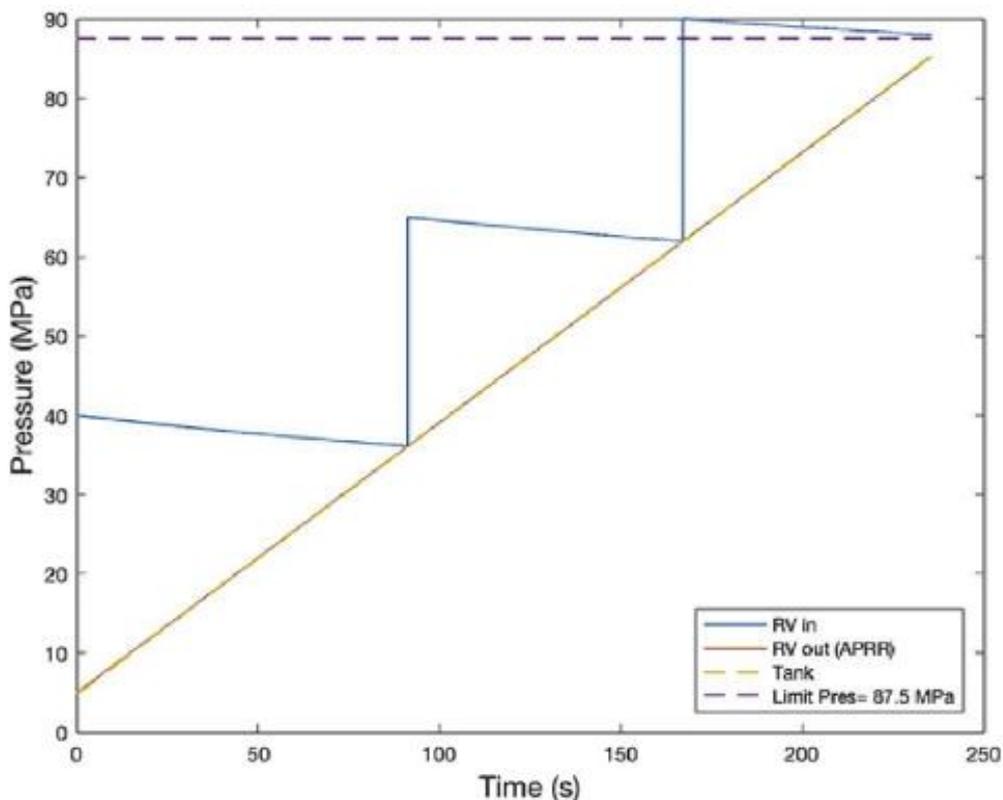


Figura 7-2. Diagrama Presión – tiempo del proceso de repostaje [36]

Dichos valores de APRR vienen tabulados en la norma tal y como se observa en la Figura 7-3. Así pues, la APRR viene definida en función de la temperatura, cuanto mayor sea ésta, menor será la APRR. Por otro lado, una vez determinada la APRR y conociendo la presión inicial del tanque, se determina la presión objetivo a la cual finaliza el repostaje. [37]

**Top-Off Fueling Parameters**

Ambient Temperature, $T_{amb}$ [°C]	APRR [MPa/min]	Target Pressure $P_{target}$ [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top-Off APRR [MPa/min]	Target Pressure, $P_{target}$ [MPa]													
		Initial Tank Pressure, $P_o$ [MPa]																
		0.5-5 (no interpolation)	0.5	2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	>70				
>50		No Fueling				No Fueling												
50	5.1	78.2	87.5	2.6	Top-Off Fueling	80.8	85.7	86.8	86.5	85.8	85.0	84.0	82.7	81.1	No Fueling			
45	8.1	76.3	87.5	4.0		81.1	86.9	86.6	86.2	85.3	84.3	83.0	81.6	79.7				
40	11.5	73.2	87.5	5.4		81.1	86.9	86.4	85.9	84.7	83.5	82.0	80.3	78.3				
35	12.4	72.9	87.5	5.6		81.2	86.9	86.4	85.9	84.7	83.4	81.9	80.2	78.2				
30	15.3	70.6	87.5	6.6		81.0	86.8	86.3	85.6	84.3	82.8	81.2	79.4	77.2				
25	18.5	69.0	87.4	7.2		81.0	86.8	86.1	85.4	83.8	82.2	80.4	78.5	76.1				
20	21.8	67.9	87.4	7.6		81.2	86.8	85.9	85.1	83.3	81.5	79.6	77.5	75.1				
10	28.0	66.3	87.4	9.0		81.2	86.8	85.7	84.7	82.6	80.5	78.3	76.1	73.4				
0	28.5	No Top-Off Fueling				78.4	84.6	86.8	85.6	84.4	83.1	80.6	78.1	75.6		73.1	No Fueling	
-10	28.5	No Top-Off Fueling				82.2	87.1	86.4	85.2	84.0	82.8	80.4	77.9	75.4		72.9		
-20	28.5	No Top-Off Fueling				86.0	86.8	86.1	84.9	83.7	82.4	80.0	77.6	75.1	72.7			
-30	28.5	No Top-Off Fueling				86.8	86.5	85.7	84.5	83.3	82.1	79.6	77.2	74.9	72.5			
-40	28.5	No Top-Off Fueling				86.5	86.2	85.4	84.2	83.0	81.8	79.3	77.0	74.6	72.3			
<-40		No Fueling																

Figura 7-3. Tabla de valores de presiones de la SAE J2601

Como aspectos positivos de esta tecnología, se destacan los siguientes: [35]

- Es una tecnología madura
- Tiene una estrategia operacional simple en su sistema de control
- Permite una disponibilidad continua de hidrógeno a alta presión, incluso en periodos de corte de suministro eléctrico
- Requiere un compresor pequeño

Por el contrario, este sistema tiene las siguientes desventajas: [35]

- Se realiza una compresión del hidrógeno a presiones superiores a las necesarias, lo cual supone un consumo extra de energía innecesario
- Es un sistema complejo con muchos componentes
- Es necesario un tiempo de recuperación entre un ciclo de repostaje y otro
- El tener un sistema de almacenamiento a alta presión, requiere mayores medidas de seguridad, además de que el coste de estos tanques es superior en comparación con los de baja presión.

### 7.1.2 Sistema de compresión directa

En el proceso de llenado, en primer lugar, una vez determinadas las propiedades del tanque, comienza llevando el hidrógeno del almacenamiento inicial a través de una válvula y continuando hasta llegar finalmente al tanque del vehículo. [35]

De este sistema, destacan las siguientes ventajas: [35]

- No hay tiempo de recuperación para la instalación
- No requiere un sistema de almacenamiento a alta presión
- Menos complejidad en el sistema, en comparación con el de en cascada
- El trabajo realizado por el compresor es el necesario para conseguir la presión requerida, no se excede como en el caso del repostaje en cascada

Por contra, como desventajas: [35]

- Se necesitan compresores excesivamente grandes, para repostar un tanque de 7 kg, se requiere un caudal de 40 g/s; cuando los compresores comerciales son del orden de 20 g/s
- Es necesario un sistema de control complejo para el compresor ya que el caudal de hidrógeno tiene que equilibrarse con el tamaño del tanque del vehículo.
- No es posible repostar un vehículo teniendo un corte en el suministro eléctrico

En definitiva, este sistema en la práctica no se lleva a cabo, por los altos costes que supone el implementar un compresor de estas características.

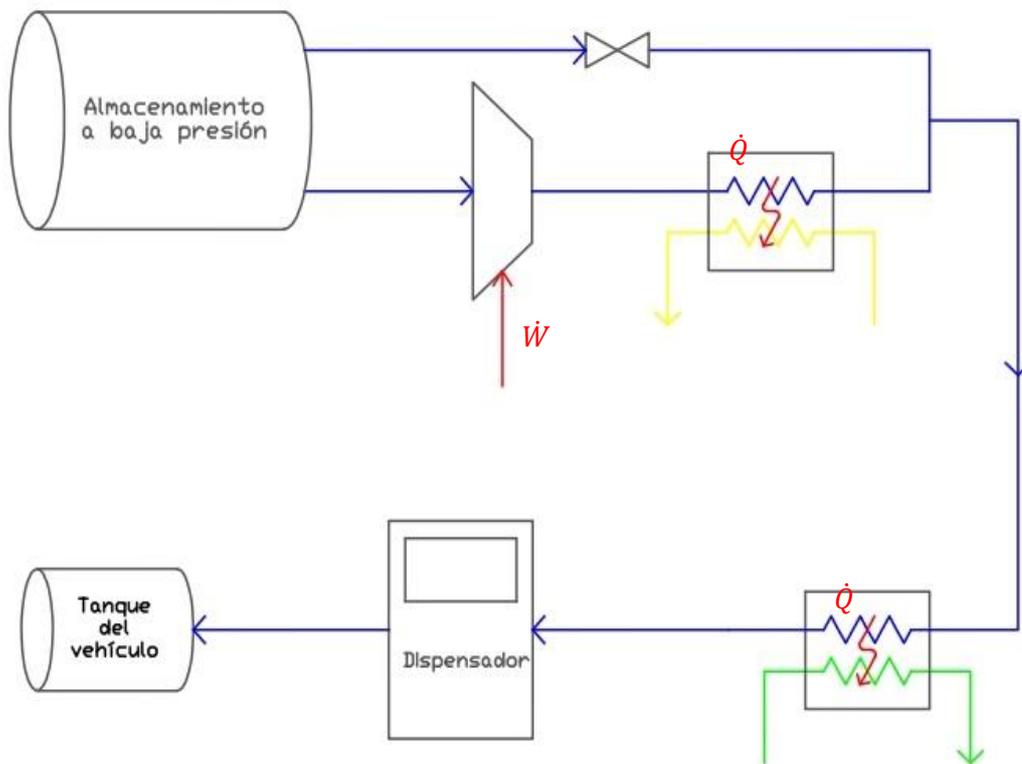


Figura 7-4. Esquema del sistema de repostaje de compresión directa. Elaboración propia

### 7.1.3 Sistema de compresión directa con acumulador

Esta tecnología se basa en el sistema de compresión directa, pero añade una variante, tras el paso por el compresor por parte del caudal de hidrógeno, se coloca un pequeño acumulador. A continuación, se explicará su función. [35]

En primer lugar, comienza el repostaje del vehículo a través del caudal del depósito a baja presión, este proceso finaliza hasta que la presión no es suficiente para seguir abasteciendo de hidrógeno al vehículo. Por lo que, a continuación, empieza a surtir de hidrógeno el acumulador, el cual se encuentra a alta presión, así pues, cuando se comienza a requerir mayor presión en el caudal, el compresor se pone en funcionamiento y comienza a rellenar al acumulador.

Como ventajas de este sistema, se destaca: [35]

- No hay tiempo de recuperación entre un proceso de repostaje y otro.
- Se requiere solo un pequeño tanque a alta presión (acumulador)

Y como aspectos negativos, comparte los mismos que el caso de compresión directa, el problema radica en las características del compresor, el cual debe ser capaz de impulsar un gran caudal de hidrógeno, además de que su sistema de control es complejo de implementar. Además, esta instalación es incapaz de funcionar cuando se produce algún corte en el suministro eléctrico. [35]

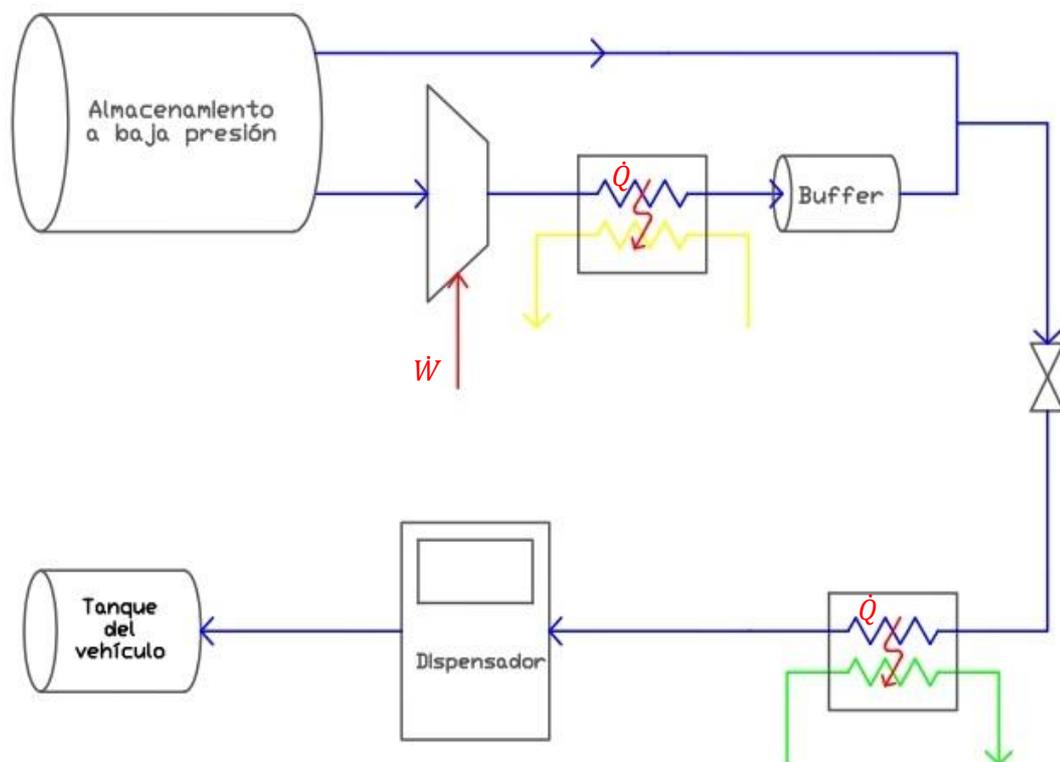


Figura 7-5. Esquema del sistema de compresión directa con acumulador. Elaboración propia

## 7.2 Sistemas de repostaje con almacenamiento inicial de LH<sub>2</sub>

### 7.2.1 Con dispensador de CGH<sub>2</sub> y ciclo de refrigeración

En primer lugar, el LH<sub>2</sub> es depositado en tanques a baja presión. Como el hidrógeno líquido requiere muy bajas temperaturas para permanecer en ese estado físico, cualquier transferencia de calor desde el ambiente por pequeña que sea, va a producir evaporaciones parciales en el interior del tanque. [38]

Es por ello, que ese hidrógeno en estado gas es necesario evacuarlo del tanque, debido a que produce sobrepresiones en el interior, es por ello que existe dos alternativas, instalar una válvula que se regule en función a la presión interna del depósito y cuando se exceda la presión de seguridad, se abra y se ventee al ambiente o bien, emplear un intercambiador de calor y posteriormente comprimir el hidrógeno a la presión deseada. La segunda opción es la más eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento del combustible.

Por su parte, el LH<sub>2</sub> es impulsado por una bomba y posteriormente, es calentado por un evaporador hasta que se produce el cambio de estado y se alcanza la temperatura requerida. Así pues, ambos caudales, el que proviene del hidrógeno que parcialmente se ha evaporado en el interior del almacenamiento y éste último descrito, convergen y se dirigen al sistema de almacenamiento a alta presión, el cual suele emplearse el sistema en cascada, posteriormente, se encuentra la válvula de control, el sistema de refrigeración y el dispensador de hidrógeno.

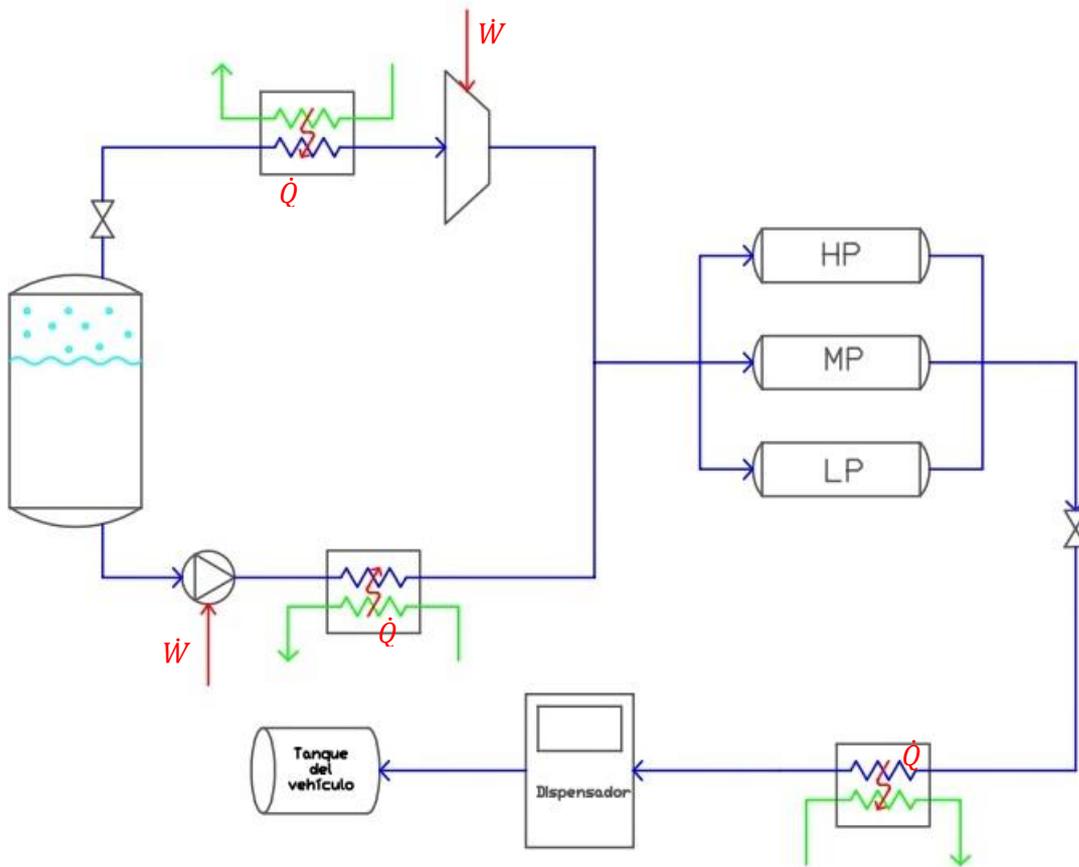


Figura 7-6. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de CGH<sub>2</sub> y con ciclo de frío a partir de LH<sub>2</sub>

### 7.2.2 Con dispensador de CGH<sub>2</sub> y sin emplear ciclo de refrigeración

El funcionamiento de este sistema es el siguiente, en primer lugar, el hidrógeno es depositado en los tanques de baja presión, los cuales se suelen encontrar entre 0.1 MPa y 0.4 MPa y a -253 °C de temperatura, así pues, desde este primer almacenamiento, el hidrógeno líquido es impulsado y presurizado a través de una bomba criogénica, a partir de la cual, divide el caudal en dos, una de las corrientes llega al sistema de gestión térmica, su función es calentar el caudal de hidrógeno, pasando de estado líquido a gaseoso y para asegurar que las condiciones para el sistema de almacenamiento en alta presión son las correctas. La otra corriente se dirige hacia la válvula de control hasta llegar finalmente dicho caudal al tanque del vehículo.

Así pues, el repostaje del vehículo se alcanza empleando una mezcla de ambas corrientes. En primer lugar, el hidrógeno en estado criogénico comienza llenando el tanque, sabiendo que la temperatura límite de la entrada del tanque es de -40 °C, se consigue alcanzar mezclando este caudal con el que proviene del almacenamiento a alta presión. [38]

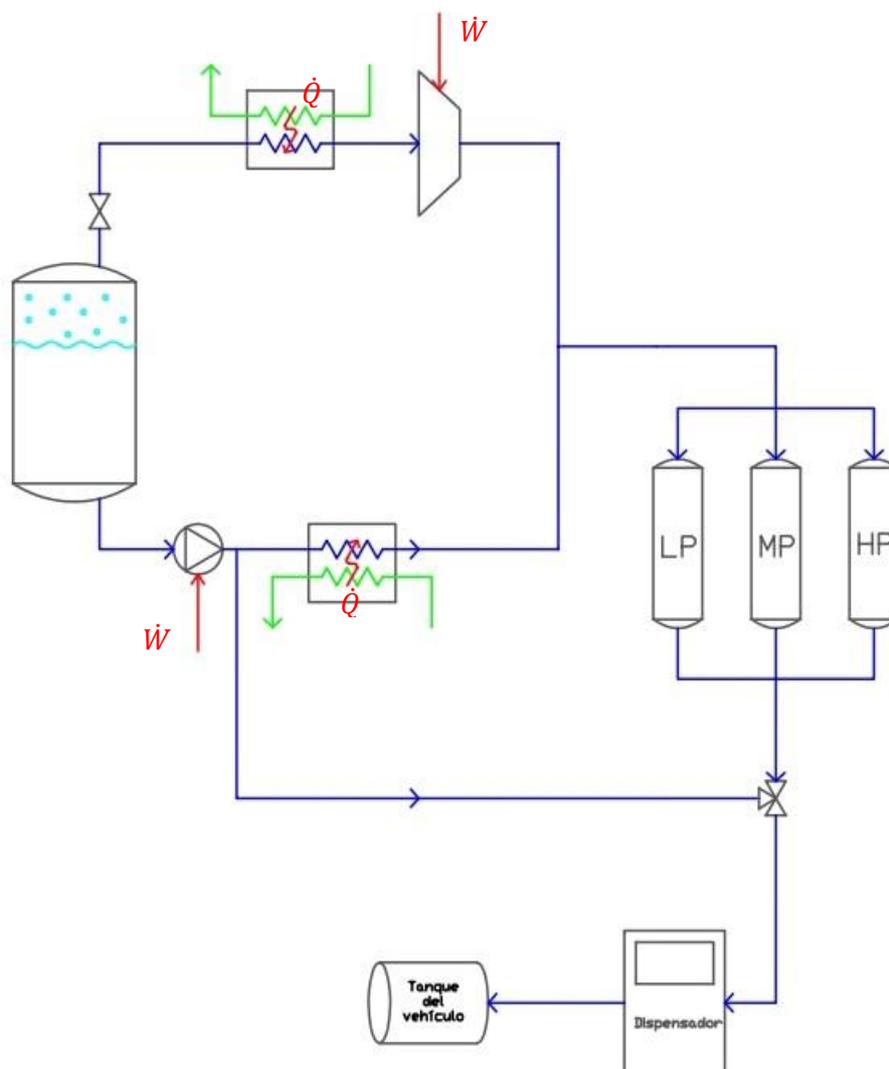


Figura 7-7. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de CGH<sub>2</sub> y sin ciclo de frío a partir de LH<sub>2</sub>

### 7.2.3 Con dispensador de LH<sub>2</sub> y CGH<sub>2</sub>

Aunque actualmente, la mayor parte de vehículos emplean el CGH<sub>2</sub> para el almacenamiento on-board, se prevé que para 2050, la producción y distribución en forma líquida reducirá el precio del hidrógeno en comparación con los procedimientos actuales.

Como principal ventaja de los vehículos que emplean el LH<sub>2</sub>, es que permite almacenar el combustible a mayor densidad en comparación al estado gaseoso y hacer más fácil su transporte. La densidad del hidrógeno líquido es de 70.8 kg/m<sup>3</sup> a -253 °C y a 1 bar, mientras que la del hidrógeno gaseoso es de 60.4 kg/m<sup>3</sup> pero para valores de presión de 1000 bares. Por contra, el proceso de licuefacción es muy intensivo energéticamente, emplea del orden del 30/40 % del contenido energético del hidrógeno no licuado. [39]

En Europa, existe únicamente 20 instalaciones en las que se genera LH<sub>2</sub>, es aún una tecnología poco madura.

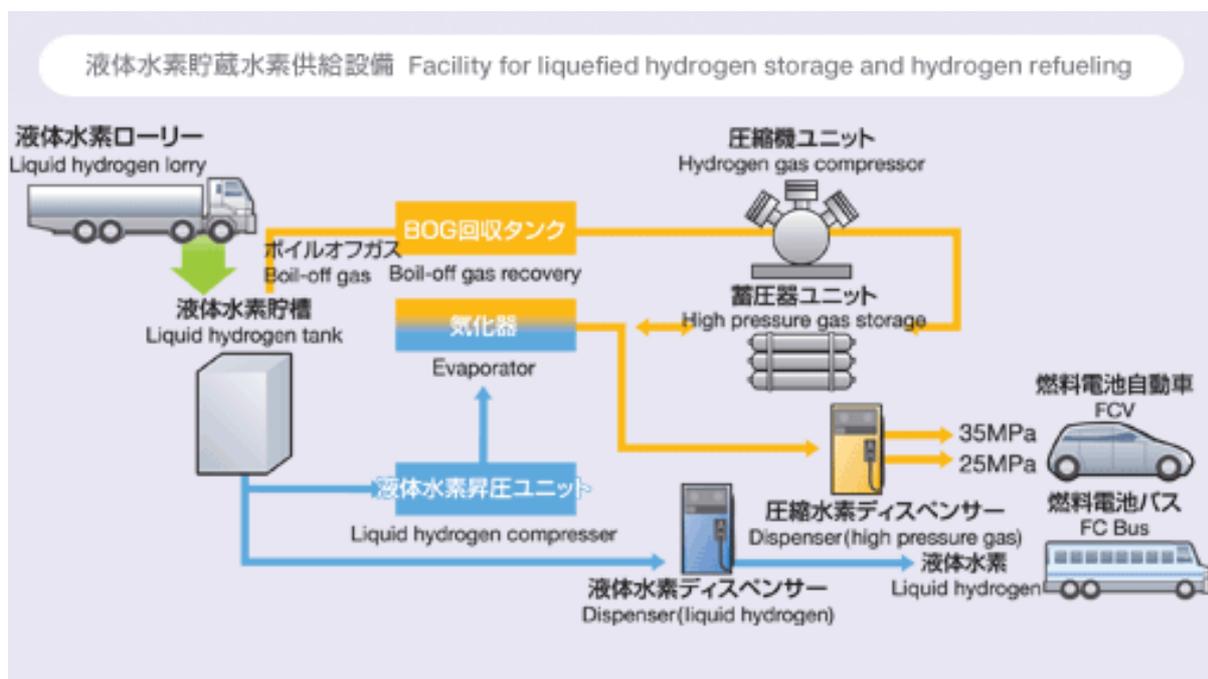


Figura 7-8. Esquema general de la hidrogenera con dispensador de LH<sub>2</sub> y CGH<sub>2</sub> a partir de LH<sub>2</sub> [40]

# 8 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

## 8.1 Efecto Joule-Thomson

En este apartado, se va a analizar en profundidad el proceso termodinámico que sucede en la válvula de control de la estación de servicio. Su principal cometido es la de regular y ajustar la caída de presión que se requiere para un correcto repostaje del vehículo.

En general, cuando se hace pasar un fluido por una válvula de expansión isoentálpica, además de la correspondiente reducción de la presión, se produce un descenso de su temperatura tal y como se puede observar en el diagrama  $P-h$  cuando se produce el paso del estado 1 al 2, sin embargo, esto no siempre sucede. La temperatura del fluido puede permanecer invariable o incluso que aumente durante un proceso de estrangulamiento. [41]

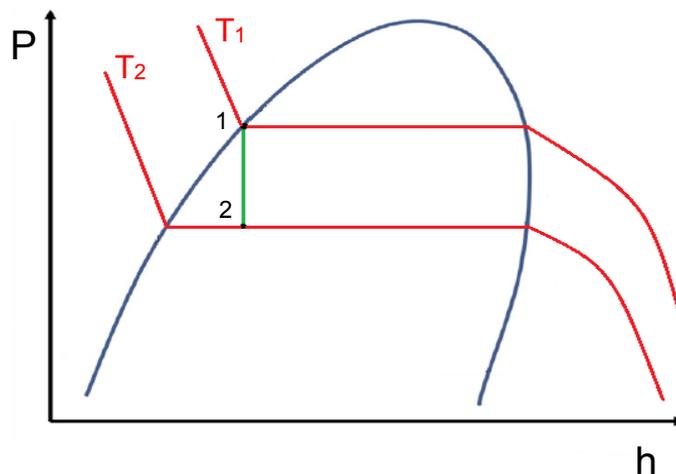


Figura 8-1. Diagrama P-h. Elaboración propia

La temperatura final tras la expansión producida en la válvula de control va a depender del coeficiente de Joule-Thomson, el cual se define como [42]

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h \quad (8-1)$$

Este parámetro es una medida del cambio de la temperatura con respecto a la presión en procesos de entalpía constante. Por lo tanto, puede plantearse las tres posibles situaciones:

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 & \text{La temperatura aumenta} \\ = 0 & \text{La temperatura permanece constante} \\ > 0 & \text{La temperatura disminuye} \end{cases}$$

Así pues, el coeficiente de Joule-Thomson representa la pendiente de las líneas  $h$  constante en un diagrama  $T$ - $P$ . Se puede obtener de forma experimental al variar el tamaño de la válvula y midiendo las condiciones de presión y temperatura a su salida, uniendo dichos puntos, se obtiene la curva isoentálpica que modela dicho proceso.

Repitiendo dicho procedimiento, pero esta vez variando las condiciones iniciales del fluido a la entrada de la válvula, se obtiene un conjunto de curvas de  $h = \text{constante}$ . Como se puede observar, dichas curvas tienen puntos en donde su pendiente es nula. Uniendo dichos puntos se obtiene la línea de inversión.

Así pues, en los puntos donde se cortan las líneas de inversión con las curvas isoentálpicas, se obtiene la temperatura de inversión. En los puntos a la izquierda de dicha temperatura, el coeficiente de Joule-Thomson es positivo, en cambio, los que están a la derecha, el coeficiente toma valores negativos.

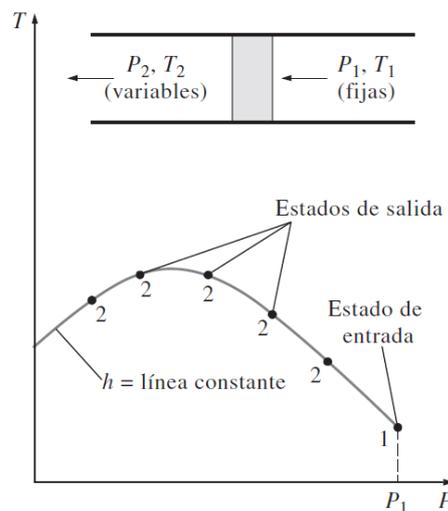


Figura 8-2. Diagrama T-p [42]

Por tanto, es importante conocer la temperatura de inversión para el proceso, en el caso del hidrógeno, dicha temperatura se sitúa en los  $-49\text{ °C}$  [ $T^{\circ}\text{ inv H}_2$ ]. Durante el proceso del ajuste de presión por parte de la válvula de control, la temperatura de entrada suele rondar del orden de  $20\text{ °C}$ , por lo que el coeficiente de Joule-Thomson es negativo y como a consecuencia a ello, la temperatura a la salida aumenta con respecto a la inicial.

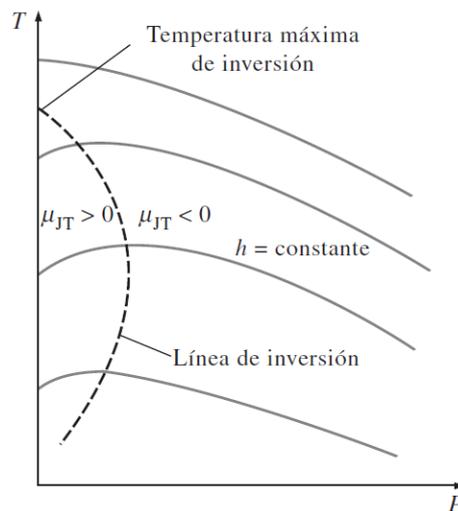


Figura 8-3. Diagrama T-p [42]

## 8.2 Tecnología aplicada

Una PCU (Pre-cooling unit) que se emplea normalmente en una HRS se basa en el siguiente ciclo de refrigeración termodinámico:

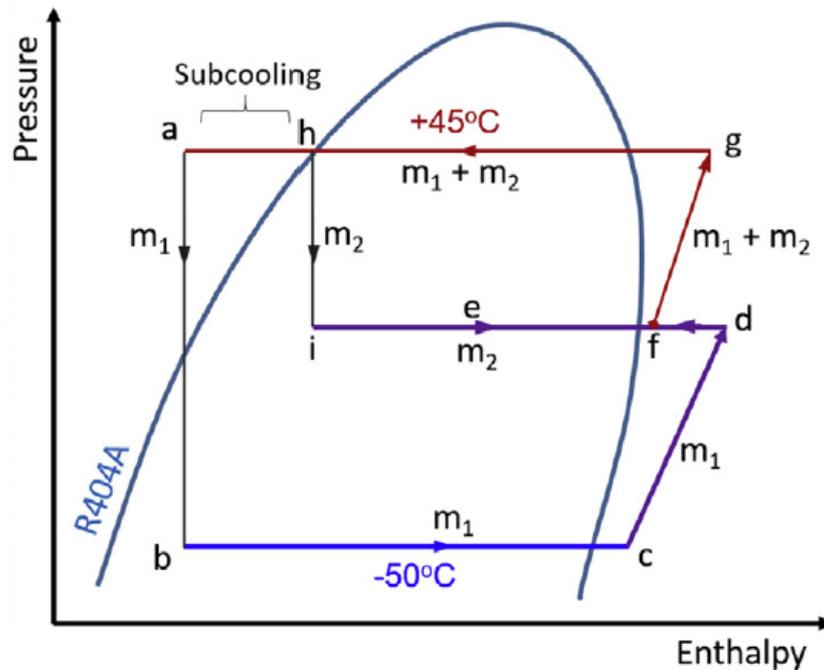


Figura 8-4. Diagrama P-h del ciclo de refrigeración [43]

En primer lugar, se hace circular un refrigerante a través de un compresor de dos etapas, un condensador, una válvula de expansión termostática y por último un evaporador.

Este ciclo de refrigeración aplica un subenfriamiento de refrigerante para maximizar el efecto de refrigeración en el evaporador haciendo circular una porción del refrigerante que sale del condensador a través de la válvula de expansión, el subenfriador HX y la segunda etapa del compresor.

El hidrógeno dispensado se enfría previamente liberando energía al refrigerante a baja temperatura a través del evaporador HX. El intercambiador de calor del evaporador puede diseñarse con una gran masa térmica (principalmente para actuar como un amortiguador y, por lo tanto, reducir la capacidad de refrigeración requerida), o puede tener un diseño compacto para propósitos de empaque. La Tabla 1 proporciona una comparación cualitativa entre grandes masas térmicas y HX compactos. Cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas. [43]

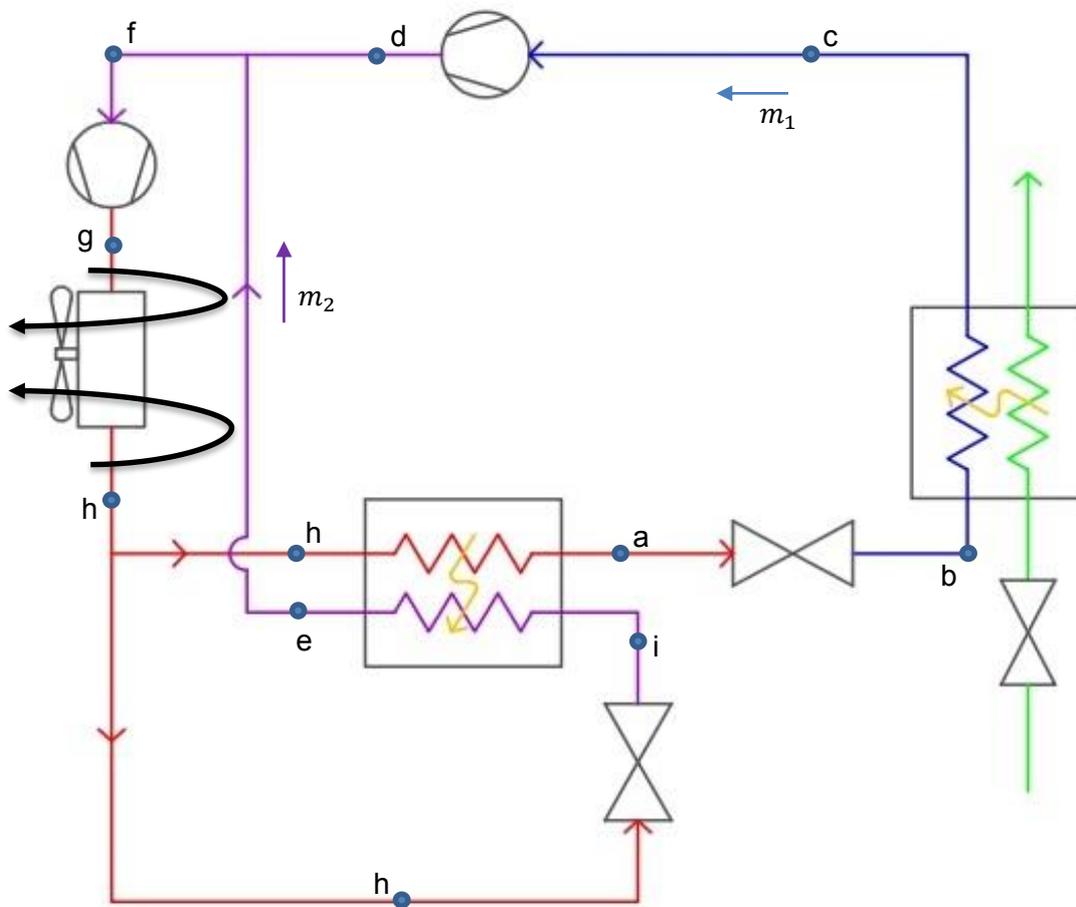


Figura 8-5. Diagrama de equipos de la PCU. Elaboración propia

# 9 ASPECTOS DE SEGURIDAD

---

La operación y puesta en marcha de una instalación de carácter industrial con las suficientes garantías en cuestiones de seguridad es fundamental para su correcto funcionamiento, y las estaciones de servicio de hidrógeno no iban a ser menos, distintas cuestiones como la protección contra incendios y explosiones, las condiciones del emplazamiento para almacenar el hidrógeno, el sistema de ventilación o los principios y operaciones de emergencia vienen recogidas en la norma UNE-ISO/TS 20100 con la cual se basará la elaboración de este capítulo.

## 9.1 Protección contra incendios y peligro de explosión [44]

Como medidas para llevar a cabo para evitar posibles escapes, en la norma se distinguen las siguientes:

Las medidas de prevención pasivas las cuales se encuentran:

- El uso de juntas construidas de forma que limite la tasa de escape máximo a un valor predecible.
- La ventilación natural.

Por su parte, como medidas de prevención activa se incluye, entre otras:

- La ventilación forzada
- Uso de sistema de detección de gas inflamable
- Otras medidas para la detección de fugas como la medición de la presión en relación con los valores de control.

Como referencia en cuanto al sistema de ventilación, ya sea de tipo natural o forzada, para evitar mezclas inflamables, se establece que la fracción de volumen de hidrógeno debe ser menor al 1% o inferior del 25 % del límite más bajo de la inflamabilidad (LFL) de cualquier otro gas inflamable.

Si se produjera algún fallo, ya sea en la ventilación o en la detección de gases inflamables, se llevaría a cabo el corte provisional de suministro de hidrógeno de la instalación

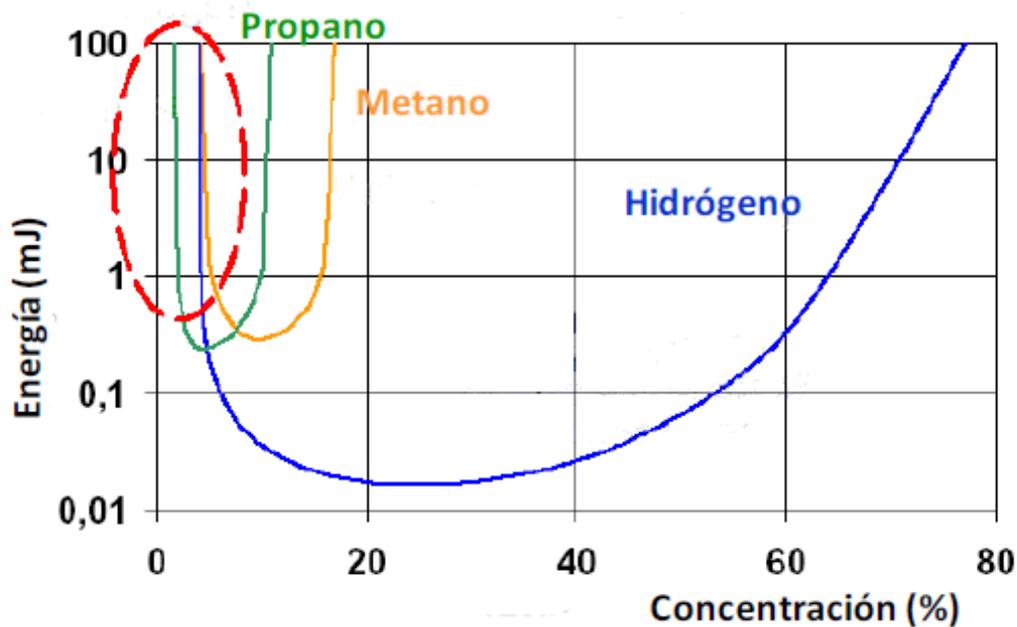


Figura 9-1. Energía de activación en función a la concentración [45]

## 9.2 Requisitos de los emplazamientos de los tanques de almacenamiento de H<sub>2</sub> [44]

### 9.2.1 A nivel de suelo

Bajos estas condiciones, deberán estar al aire libre y sobre una losa de hormigón armado (o estructura similar). Además, los tanques, situados dentro de una distancia de 15 m del almacenamiento sobre el suelo de cualquier clase de líquido inflamable y combustibles, deben situarse con una superficie de apoyo más alta que dicho almacenamiento, excepto en el caso de que exista algún tipo de protección como muros de contención de tierras o diques.

### 9.2.2 Bóvedas subterráneas

Las paredes de la bóveda, en donde irá en su interior los tanques de almacenamiento, tienen que ser más altas que la de dichos tanques. Además, a excepción de los accesos, el sistema de ventilación... no debe existir ningún tipo de abertura. La parte superior de la bóveda debe diseñarse para permitir el escape de posibles fugas de hidrógeno.

### 9.2.3 Parte superior de la marquesina

Para situar el sistema de almacenamiento en la marquesina, se tiene que diseñar de forma de que sean capaces de soportar el peso de los tanques, además de otras cargas estáticas y dinámicas, siguiendo la normativa del código de construcción correspondiente a este tipo de estructura.

#### **9.2.4 Cubierta**

Como condición para que puedan situarse en esa zona, tiene que ser techos de edificios de una sola planta horizontal, además tiene que seguir cumpliendo el criterio de distancias mínimas de seguridad. Sus estructuras no deben excederse más de 3 m desde el borde del techo. El acceso fijo al techo se debe proporcionar para elevaciones que sean mayores a 4 m. En el caso de elevaciones superiores a 8 m, el acceso fijo se hará a través de una escalera que no supere una cota de 4 m.

### **9.3 Sistemas de ventilación [44]**

El sistema de ventilación es un elemento fundamental para evitar la formación de posibles atmósferas explosivas, para ello, las instalaciones se tienen que equipar de conexiones de ventilación de purga o respiradores de venteo para reconducir el hidrógeno hacía un lugar donde se pueda evacuar con seguridad a la atmósfera. La ventilación se debe diseñar de forma que todos los componentes sean adecuados en tamaños, presión nominal y materiales para las condiciones de servicio previstas.

En cuanto a los venteos, se deben disponer para que la descarga sea en un lugar seguro al aire libre de modo que no impida la incidencia de gases de escape sobre el personal que trabaje en la estación de servicio o sobre cualquier estructura u otro sistema de la hidrogenera.

### **9.4 Principios y operaciones de emergencia [44]**

Para este tipo de instalaciones se requiere crear procedimientos de emergencia completos para cada estación de repostaje particular en consulta con las autoridades locales responsables del servicio contra incendios, además, se deben usar simulaciones periódicas.

Debe existir también medios de detección de incendios para evitar el agravamiento debido a la propagación de llamas en equipos próximos, como es el caso de sensores de emisiones ultravioletas para el caso del fuego provocado por el hidrógeno, además de detectores de humos tradicionales, ya que puede afectar a otros sistemas y al resto de la instalación.

Así pues, se debe proporcionar válvulas de aislamiento de emergencia que desconecten el suministro de hidrógeno en caso de emergencia.

# 10 ANÁLISIS DE COSTES

A continuación, una vez estudiada las cuestiones técnicas relacionadas con las estaciones de servicio de hidrógeno, este nuevo capítulo se va a centrar en analizar los costes asociados de este tipo de instalación, en primer lugar, desde un punto de vista general para, a continuación, estudiar en detalle los distintos sistemas y componentes que conforman las hidrogeneras y su influencia tanto en el coste total como en función con el precio del hidrógeno.

## 10.1 Introducción general

Según un estudio de mercado realizado por la Agencia Internacional de la Energía, actualmente el coste de inversión de este tipo de instalación se sitúa entre 1,2 y 2,1 millones de euros, si la evolución es la esperada, el rango puede reducirse a unos 0,8 y 2 millones de euros, para finalmente alcanzar un coste aproximado de entre 0,6 y 1,6 millones de euros siempre y cuando la implantación del vehículo de hidrógeno alcance un nivel de madurez en el mercado que estimule la demanda de este combustible. [46]

Estos intervalos de costes son a grandes rasgos, pero el valor económico de las estaciones de servicio de hidrógeno va a depender en gran medida de la capacidad de suministro del combustible, además del tipo de hidrogenera, así pues, en la siguiente tabla se especifica el orden de magnitud del coste para llevar a cabo dichas instalaciones. [46]

Tabla 10-1. Coste de la HRS en función de la capacidad y generación [46]

Capacidad de la HRS [kg <sub>H2</sub> /día]	Tipo de HRS			
	On-site y reformado [M€]	On-site y electrólisis [M€]	GH <sub>2</sub> y off-site [M€]	LH <sub>2</sub> y off-site [M€]
100	0,9 – 2,6	1,0 – 2,6	1,1 – 1,8	0,7 – 2,1
480	1,9 – 4,6	1,9 – 5,4	1,9 – 2,4	1,5 – 2,9
1000	3,2 – 4,8	4,0 – 7,9	3,2	2,4

Como se puede observar, las instalaciones que a priori son actualmente las más económicas en cuanto a su coste de inversión, son las correspondientes a las estaciones de servicio que tienen su generación de hidrógeno descentralizada tanto en el caso de las que distribuyen hidrógeno líquido como en forma de gas comprimido.

## 10.2 Evolución del coste capital

Así pues, debido a la variedad de tipología que existe en cuanto a las estaciones de servicio de hidrógeno, además, teniendo en cuenta la diversidad en relación con su capacidad de suministro y las distintas tecnologías que se emplean para estas instalaciones. En el siguiente estudio, se realiza un promedio de costes medios para poder predecir la evolución del coste capital de las HRS. [46]

Por lo tanto, como se puede apreciar en la siguiente gráfica, se establece 3 curvas de tendencias, cada una de ellas en función de si se produce una madurez e implementación en el mercado en mayor o en menor grado. Todas ellas tienen en común en que predicen que va a existir un aumento progresivo de los costes hasta, aproximadamente, el año 2025 a partir de ese momento, tras producirse ese máximo en las curvas, la tendencia de la evolución del coste capital es que se vaya reduciendo. [46]

Todo ello se debe ya que, durante los primeros años, desde la actualidad hasta mediados de la década de los años 20, se espera que se construya estaciones de servicio de hidrógeno con generación “in-situ”, lo cual, como se ha analizado en el anterior apartado, este tipo de instalaciones son las que requiere un mayor coste de inversión inicial, que en comparación con las primeras hidrogeneras construidas, las cuales la mayoría tienen su producción de hidrógeno descentralizada, supone un aumento de los costes. Sin embargo, se espera que tras una previsible expansión de esta tecnología y que, a partir de economías de escala, se consiga una reducción del coste capital. [46]

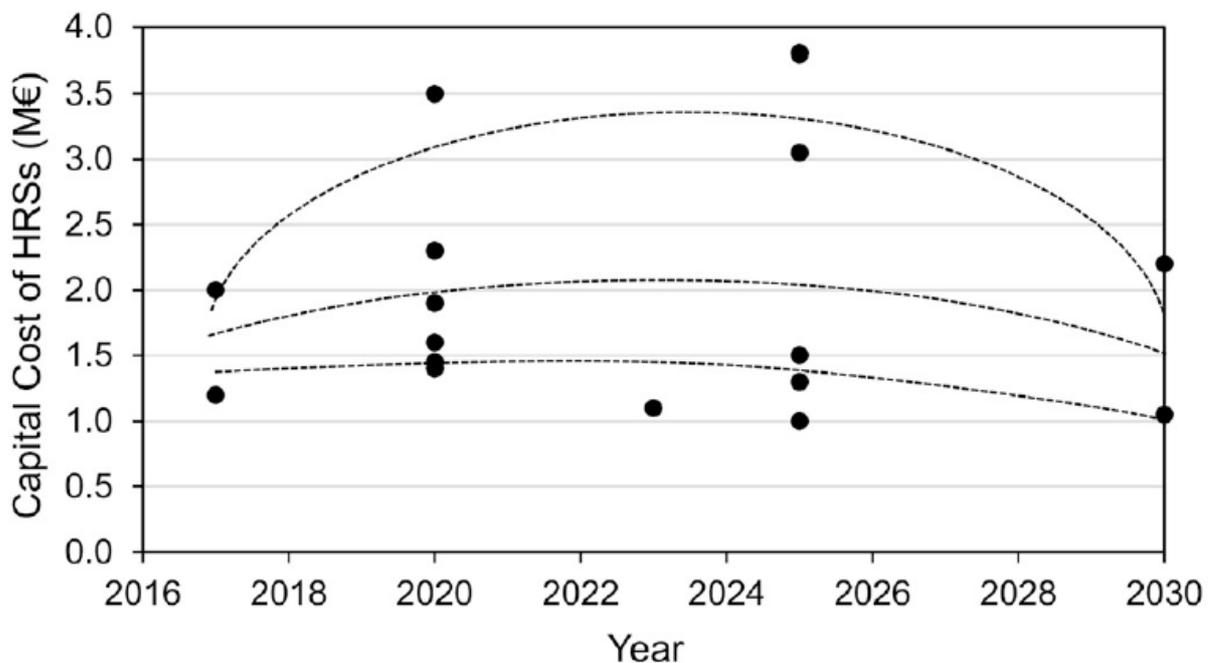


Figura 10-1. Evolución del coste capital de la HRS [46]

### 10.3 Análisis de componentes en función a su coste

Tras estudiar de forma general los costes asociados a la puesta en marcha de la instalación de la estación de servicio de suministro de hidrógeno, se va a analizar el coste particular que supone cada uno de los sistemas que la conforma, entre los que distinguimos el sistema de compresión, los tanques de almacenamiento, el dispensador y el sistema de refrigeración.

#### 10.3.1 Compresor

En este sistema, como se puede apreciar en la siguiente gráfica, el coste del compresor depende de gran manera tanto del coste de la superficie ocupada por la industria que fabrica dicho compresor y también por el coste capital del equipo. Si se aumenta progresivamente la producción de este equipo al año, se reduce drásticamente el peso en el valor final del producto por parte de ambos costes anteriormente mencionados. Pasando de unos 30.000\$ en el caso de una producción de 10 unidades anuales a alrededor de 5.000\$ por compresor cuando se fabrican 500 unidades anuales. [47]

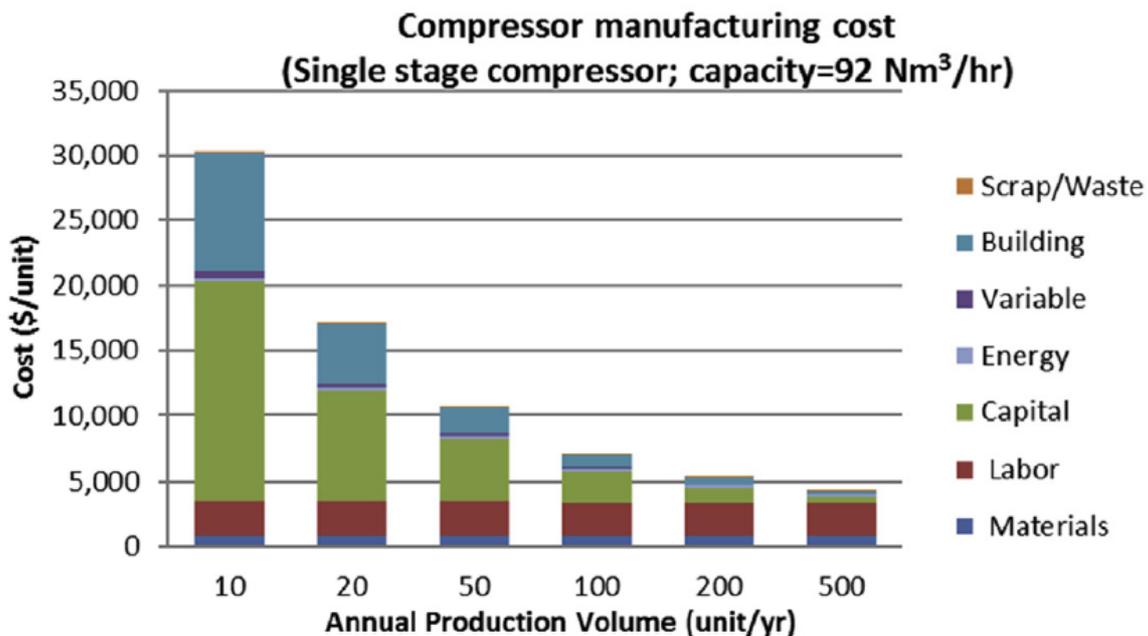


Figura 10-2. Coste del compresor en función a la producción anual [47]

#### 10.3.2 Tanques de almacenamiento

El principal inconveniente en la fabricación de los tanques de almacenamiento es el elevado coste de los materiales empleados, el cual corresponde al 34CrMo4, hay que tener en cuenta que estos tanques tienen que ser capaces de soportar muy altas presiones, lo cual hace encarecer de gran manera la partida relacionada al material empleado. Sin embargo, es posible reducir el coste unitario de estos tanques si se consigue llegar a economías de gran escala, en este caso, pasando de una producción anual de 100 unidades a otra de 1000 unidades, es posible lograr un ahorro del 32% con respecto al total. Tras este, le sigue el margen de beneficio estimado con respecto al coste total de este sistema. [47]

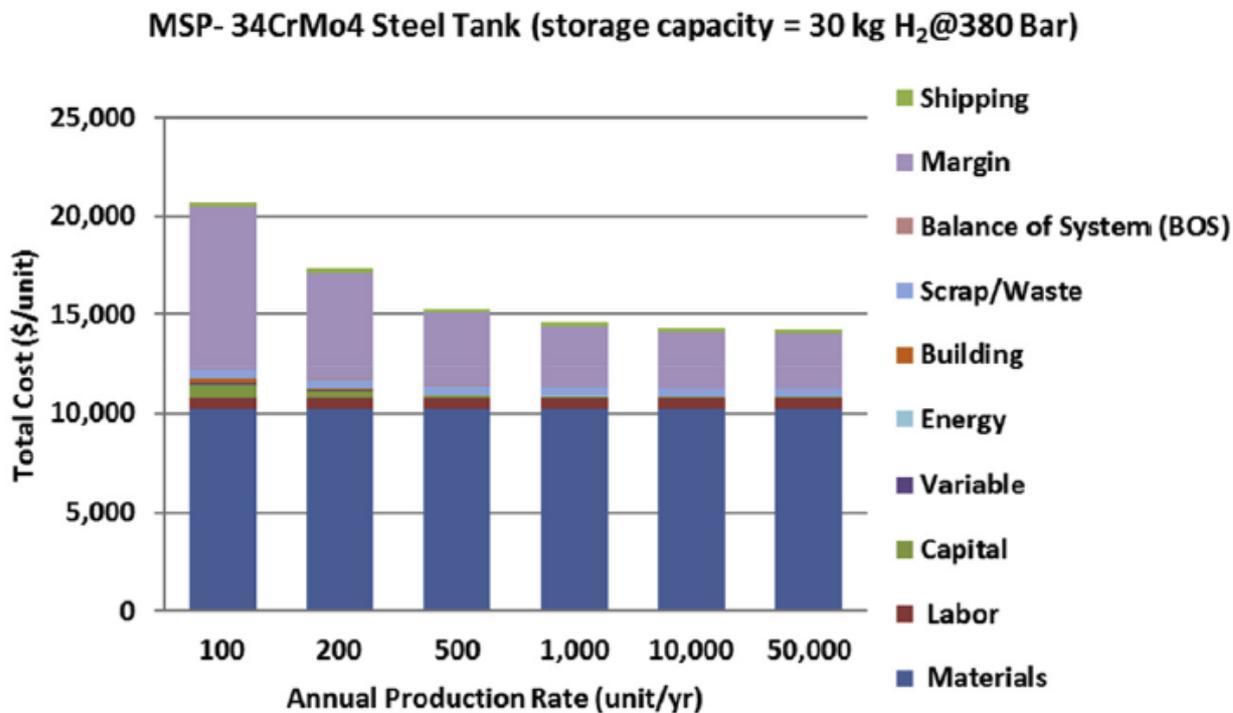


Figura 10-3. Coste del tanque de almacenamiento en función a la producción anual [47]

### 10.3.3 Dispensador

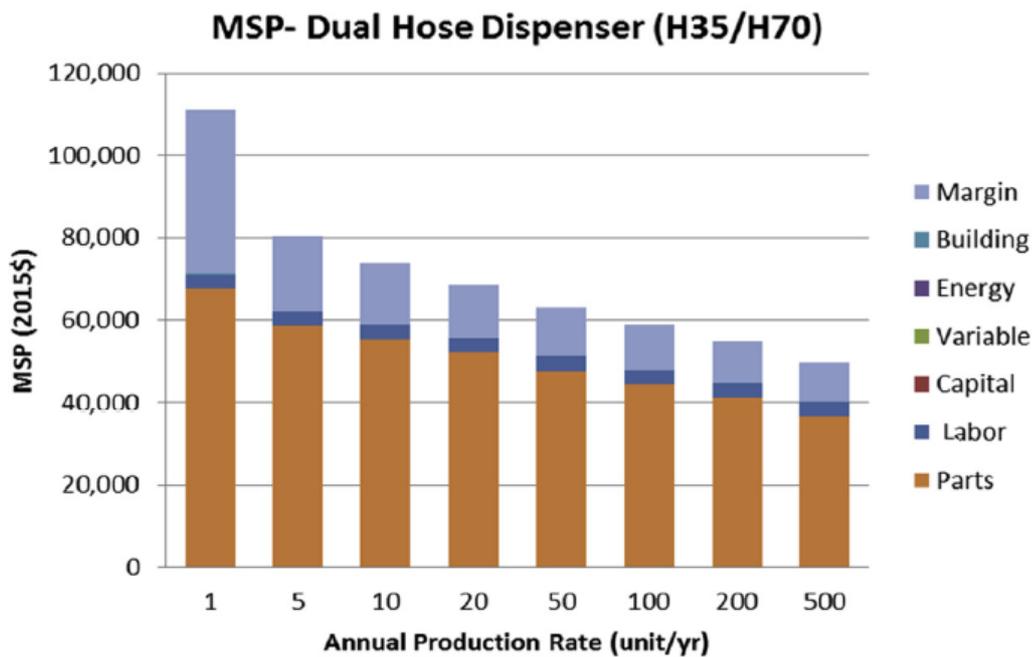


Figura 10-4. Coste del dispensador en función a la producción anual [47]

La principal particularidad de este sistema es su proceso de fabricación, el cual se basa en un proceso de ensamblaje e integración en piezas producidas externamente. Así se refleja en la Figura 10-4 , en la que el coste correspondiente a las piezas que conforman este elemento supone el que mayor peso tiene en el coste global del dispensador de hidrógeno. Para este estudio, se toma como referencia el dispensador que inyecta tanto hidrógeno a 35 MPa, el cual se emplea para vehículos pesados como autobuses o camiones, como a 70 MPa, empleado para vehículos ligeros, como puede ser el caso de los turismos. [47]

Por lo tanto, es necesario particularizar algo más esta partida económica para analizar mejor el coste total del dispensador. Como se puede apreciar en la Figura 10-5, la partida correspondiente a válvulas y medidores corresponde un 60% del coste total de las piezas, seguido por el coste de la boquilla y la manguera, el cual representa un 22% aproximadamente, por último, como elemento relevante en este coste, es el que supone los sensores que conforma el dispensador, su coste es del 7%. [47]

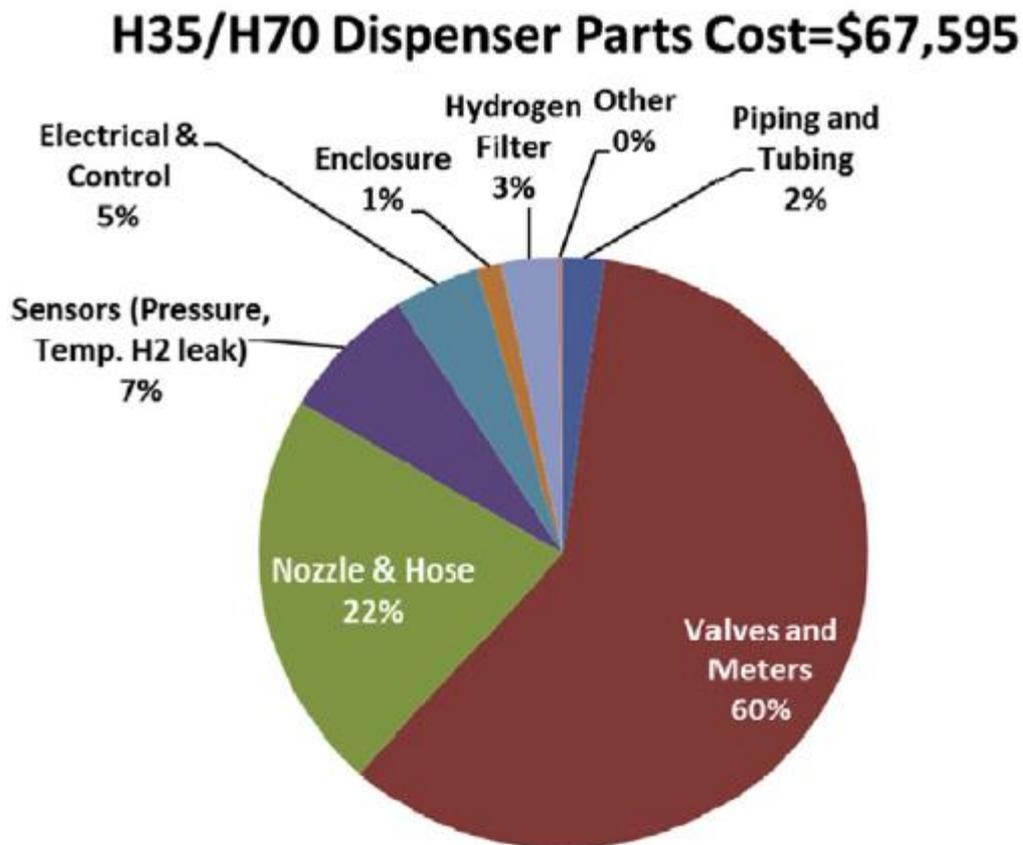


Figura 10-5. Diagrama del peso de cada parte con respecto al coste del dispensador [47]

#### 10.3.4 Sistema de refrigeración e intercambiador de calor

Para el sistema de refrigeración, debido a la complejidad del diseño de este elemento y la madurez tecnológica que posee, se va a recurrir a las curvas de coste desarrolladas por el Laboratorio Nacional de Argonne. [47]

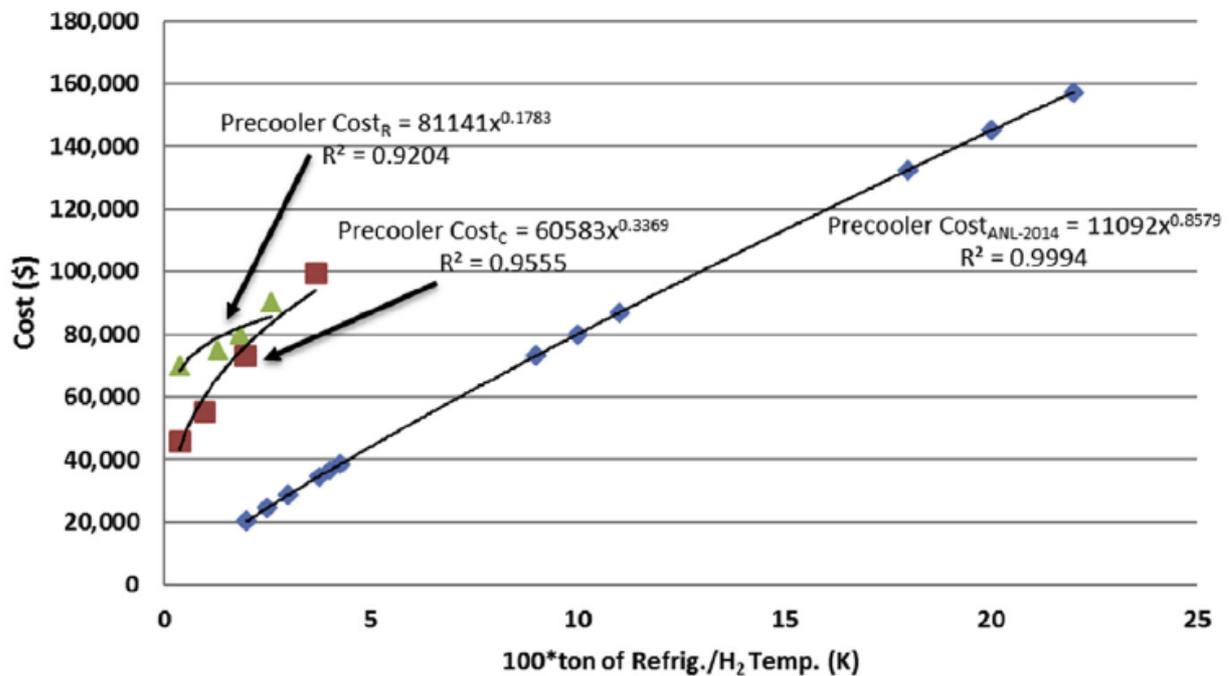


Figura 10-6. Curvas de costes del sistema de refrigeración. [47]

Por su parte, el intercambiador de calor, el cual realiza la transferencia de calor entre el caudal de hidrógeno que se va a repostar al vehículo y el refrigerante, es un elemento muy importante en el sistema de refrigeración. Su coste viene determinado por la potencia térmica que es capaz de transmitir, el tipo de tecnología que se emplee y los materiales que se usen en su fabricación. Como referencia, se tomará un intercambiador de tipo micro canal con una potencia de transferencia de calor de entre 20 y 30 kW, el cual, su coste está comprendido entre los 50.000 y 60.000 \$. [47]

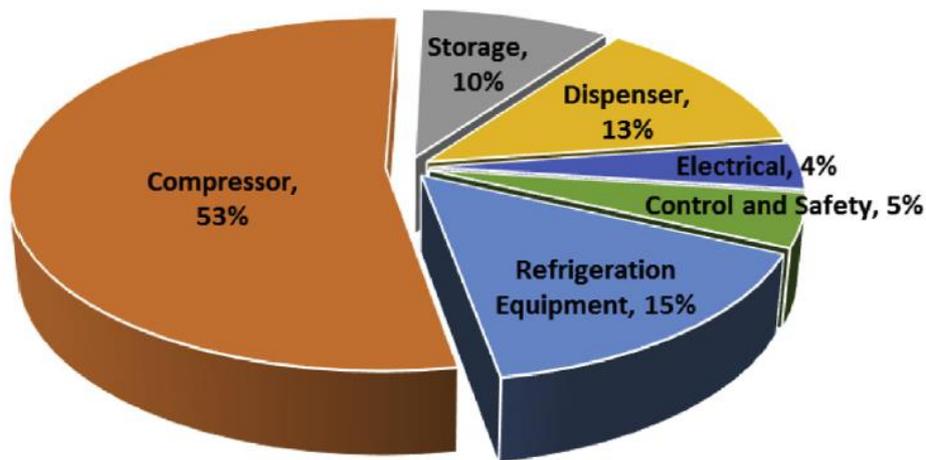
## 10.4 Efecto del coste de la HRS con el precio del H<sub>2</sub>

En este último apartado del análisis económico, se va a tratar de hallar la relación entre el precio del hidrógeno con el coste de la estación de servicio de hidrógeno, en función de los distintos sistemas que la componen como anteriormente se ha descrito. Como parámetro principal para realizar dicho estudio, se tomará el coste nivelado de la estación de repostaje, el cual se define como el coste promedio total para construir y operar una estación de servicio de hidrógeno durante su vida útil, dividido por el hidrógeno total distribuido en esa vida útil. [48]

$$\text{Coste nivelado} \left[ \frac{\$}{\text{kg}} \right] = \frac{\text{Coste de construcción y operación de la HRS en su vida útil}}{\text{Hidrógeno total dispensado en su vida útil}} \quad (10-1)$$

Así pues, dicho análisis se ha realizado con un software de simulación llamado HDSAM (Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model), esta herramienta, la cual ha sido desarrollada por el Laboratorio Nacional de Argonne, permite calcular los costes asociados de la estación de suministro de hidrógeno además de dimensionar los distintos componentes que la conforman en función de la demanda del mercado y así, poder hallar la contribución de cada sistema al coste del hidrógeno. [48]

Como condiciones iniciales de la simulación, se toma como referencia el llenado de FCEV a 700 bares, con una masa de combustible total de 5 kg y con un tiempo de llenado de 5 minutos, se toma como tiempo entre el llenado de un vehículo y otro de unos 2 minutos. Así pues, para estaciones que realizan repostajes de 500 kg/día, se obtiene los siguientes resultados: [48]



Refueling Station Component Cost Contribution

Figura 10-7. Contribución de los distintos sistemas al coste nivelado de la HRS [48]

Como se puede apreciar, algo más de la mitad del coste nivelado de la estación corresponde al compresor.

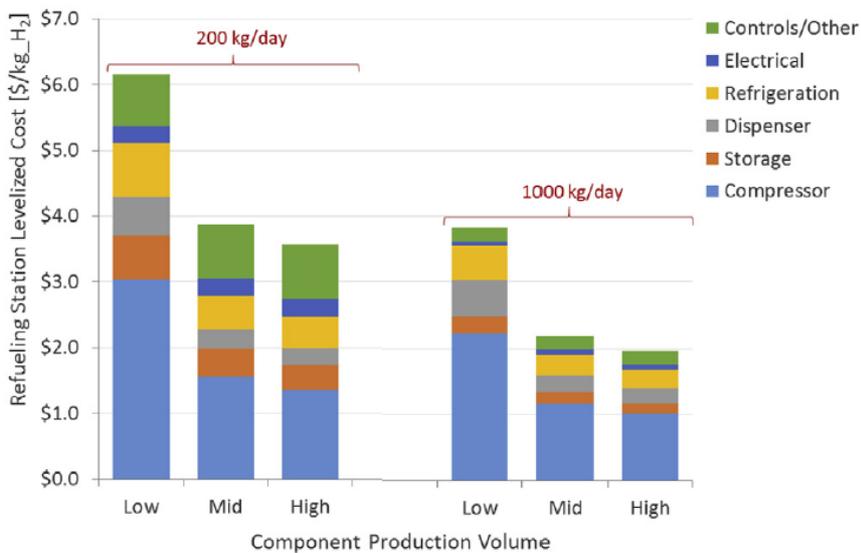


Figura 10-8. Coste nivelado de la HRS en diversas situaciones [48]

En esta nueva simulación, se plantea dos situaciones, en una se distribuye 200 kg de hidrógeno diarios y en otro 1000 kg al día, así mismo, distinguimos tres escenarios distintos en cuanto al nivel de producción de los componentes, uno bajo, otro medio y otro alto. Así pues, el peor de los escenarios posibles corresponde a una baja distribución de hidrógeno y también una baja producción de los componentes, dichas perspectivas fijarían el coste nivelado de la estación a 6 \$/kg H<sub>2</sub>. Por otro lado, estableciendo una distribución de hidrógeno a 1000 kg diarios y una alta producción de componentes conseguiría reducir el coste nivelado a aproximadamente a 2 \$/kg H<sub>2</sub>. [48]

Es por ello que alcanzando una expansión del FCEV en el mercado, lo cual propiciaría una mayor demanda de hidrógeno por parte de los usuarios, además de lograr una mejor economía de escalas en cuanto a la producción de los distintos componentes de la estación, se lograría abaratar el precio del coste nivelado. [48]

# 11 CONCLUSIONES

Para poder evaluar el posible potencial de las estaciones de servicio de hidrógeno, es fundamental conocer el alcance que tendrá el FCEV, puesto que éste será el demandante de hidrógeno de estas instalaciones. Como se puede observar en el siguiente diagrama de barras, dentro de 30 años el vehículo de pila de combustible tendrá una presencia de un 20% aproximadamente en la estadística de venta de vehículo de primera matriculación. Por lo tanto, la entrada del FCEV en el parque del automóvil a medio plazo va a ser una realidad.

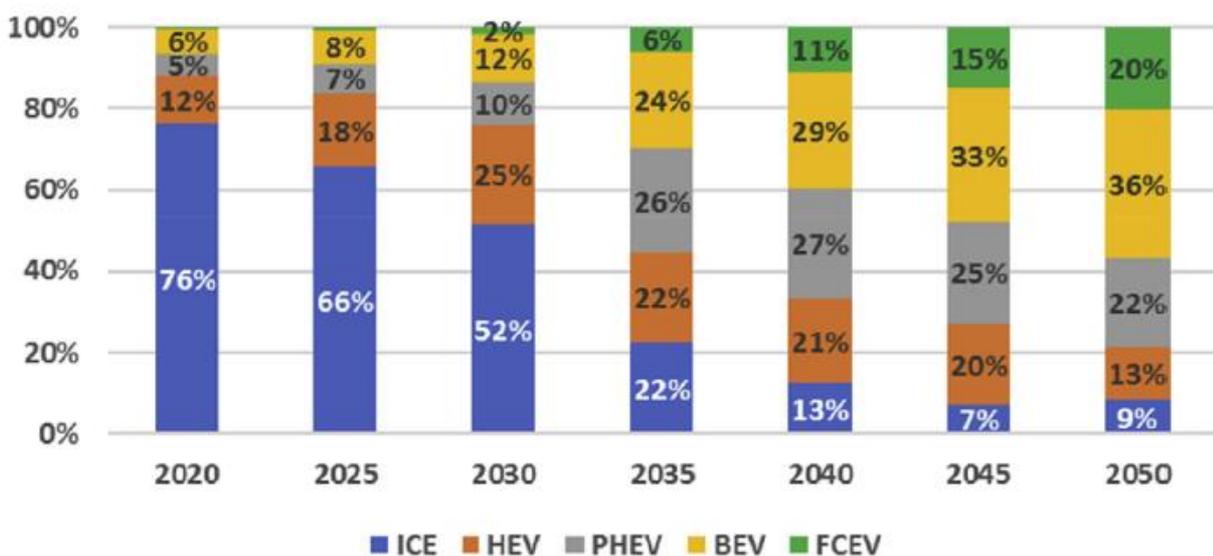


Figura 11-1. Diagrama de barras de ventas de vehículos de nueva matriculación [47]

Es por ello por lo que el vehículo de hidrógeno tendrá un papel importante en un futuro, pero será algo más secundario que con respecto al vehículo eléctrico de batería. Aún así, la infraestructura actual de repostaje de hidrógeno es claramente insuficiente para poder soportar dicho aumento de la demanda de aquí a 30 años, por lo tanto, tendrá que expandirse en los próximos años.

Según la Agencia Internacional de la Energía, la estrategia a seguir para la progresiva implantación de estas instalaciones es que, inicialmente, se crearán hidrogeneras para abastecer flotas específicas de vehículos, como los vehículos o camiones que se pueden emplear en grandes zonas industriales o en puertos o también para el caso de autobuses urbanos o taxis. Así pues, con el paso del tiempo, esta infraestructura creada se abriría para el uso público. [4]

Así pues, la AIE recomienda las siguientes políticas públicas: [4]

- Reducir el gravamen asociado al transporte de hidrógeno.
- Fomentar la colaboración de empresas del sector para crear planes comerciales.
- Emplear los impuestos recaudados en relación con el FCEV para tratar de reducir el riesgo de inversión en las nuevas estaciones de servicio que se vayan a crear.

Sin embargo, las perspectivas en España no son tan positivas, tal y como afirmó Javier Brey, presidente de la Asociación Española del Hidrógeno (AeH2). En su opinión, para poder llevar a cabo el desarrollo de la infraestructura necesaria, se requiere de un plan de acción nacional que fije objetivos a realizar en determinados plazos que permita tanto a empresas, centros de investigación o administraciones públicas, una hoja de ruta a seguir. Además, pese a los proyectos que están en marcha en territorio nacional, no se están logrando los objetivos inicialmente planteados, se propuso llegar a las 20 estaciones de servicio en este año y actualmente solo hay un total de 5. [49]

# REFERENCIAS

---

- [1] J. E. Malo Arrázola y J. E. Menéndez Pérez, «La Huella Ecológica de la Energía y sus conexiones con la Economía y la Geopolítica,» *Universidad Autónoma de Madrid*, 2013.
- [2] F. Birol, «World Energy Outlook 2018,» *International Energy Agency*, 2018.
- [3] «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <http://www.iea.org/weo>.
- [4] F. Birol, «The Future of Hydrogen,» *International Energy Agency*, 2019.
- [5] K. Mazloomi y C. Gomes, «Hydrogen as an energy carrier: Prospects and Challenges,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- [6] J. Á. Rodrigo, «Motores de hidrógeno. Tipos y características,» 2009.
- [7] H. Shekhar Das, C. Wei Tan y Y. A.H.M., «Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [8] O. Z. Sharaf y F. O. Mehmet, «An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [9] F. Barreras y A. Lozano, Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM, Universidad de Zaragoza.
- [10] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos#/media/Archivo:Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos#/media/Archivo:Ciclo_de_cuatro_tiempos.png).
- [11] D. Giacosa, «Motores endotérmicos».
- [12] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_Otto#/media/Archivo:Ciclo-otto.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Otto#/media/Archivo:Ciclo-otto.png).
- [13] M. Fàbrega Ramos, «Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna,» *Universidad Politécnica de Cataluña*, 2009.
- [14] «Motores Futuro,» [En línea]. Available: <https://motoresfuturo.wordpress.com/2011/01/14/bmw-750hl-el-primer-coche-de-hidrogeno-desarrollado-por-bmw/>.
- [15] M. Barthe Farell, «Motores rotativos. Tipologías y combustibles alternativos,» *Universidad Politécnica de Cataluña*, 2009.
- [16] «motor.es,» [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/motor-wankel>.
- [17] «motor.es,» [En línea]. Available: <https://www.motor.es/noticias/rx-8--hydrogen-re-un-mazda-con->

motor-rotativo-de-hidrogeno.php.

- [18] B. Tanç, H. T. Arat, E. Baltacioglu y K. Aydin, Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles.
- [19] Hyundai, Datasheet del Hyundai Nexo.
- [20] HyFive, «<https://www.hyfive.eu/>».
- [21] H2ME, «<https://h2me.eu/>».
- [22] H2piyR, «<http://h2piyr.eu/>».
- [23] «Enagás,» [En línea]. Available: [https://enagas.es/enagas/es/Transporte\\_de\\_gas/Atencion\\_al\\_cliente/NewslettersClientes/2017-47-03-Enag%C3%A1s\\_participa\\_en\\_un\\_proyecto\\_de\\_tracci%C3%B3n\\_ferroviaria\\_con\\_hidr%C3%B3geno](https://enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/Atencion_al_cliente/NewslettersClientes/2017-47-03-Enag%C3%A1s_participa_en_un_proyecto_de_tracci%C3%B3n_ferroviaria_con_hidr%C3%B3geno).
- [24] E. Maeso González y M. Marchante Lara, «Presente y futuro de las estaciones de suministro de hidrógeno,» de *VIII Congreso de Ingeniería del Transporte*, A Coruña, 2008.
- [25] J. Ogden, High Hopes for Hydrogen, Scientific American, 2006.
- [26] Society of Automotive Engineers, 2010.
- [27] A. Pino Priego, Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno., Sevilla, 2009.
- [28] C. F.-B. Badía, Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y perspectivas de Futuro, Sevilla, 2005.
- [29] Linde. [En línea]. Available: <https://www.linde.com/en>.
- [30] S. Tretsiakova-McNally, Safety of hydrogen storage.
- [31] «Dreanstime,» [En línea]. Available: <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-cilindros-del-tanque-de-hidr%C3%B3geno-image31038510>.
- [32] K. L. Klug y M. Olson, «Cost Efficient Off-Board Tank Storage for Compressed Hydrogen Gas,» 2008.
- [33] F. C. E. [En línea]. Available: <https://fuelcellsetc.com/2012/11/what-hydrogen-storage-is-best-for-me/>.
- [34] Toyota. [En línea]. Available: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/new-toyota-mirai#>.
- [35] E. D. Rothuizen, M. M. Rokni y B. Elmegaard, Hydrogen fuelling Stations. A thermodynamic Analysis of Fuelling. Hydrogen Vehicles for Personal Transportation., Institut for Mekanisk Teknologi, 2013.
- [36] C. Blázquez Díaz, Techno-economic modelling and analysis of hydrogen fuelling stations, University of Southampton, 2018.
- [37] K. Reddi, A. Elgowainy, N. Rustagi y E. Gupta, Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles, U.S. Department of Energy, 2017.

- [38] A. Bauer, T. Mayer, M. Semmel, M. A. Guerrero Morales y J. Wind, Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous hydrogen, 2019.
- [39] A. Causapé Rodríguez, Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro, 2006.
- [40] «Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project,» [En línea]. Available: <http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/e/station/kanto/ariake.html>.
- [41] D. Velázquez Alonso, Apuntes de Tecnología Energética, 2018.
- [42] Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, Mc Graw Hill, 2012.
- [43] A. Elgowainy, K. Reddi, D.-Y. Lee, N. Rustagi y E. Gupta, Techno-economic and thermodynamic analysis of pre-cooling systems at gaseous hydrogen refueling stations, 2017.
- [44] N. UNE, UNE-ISO/TS 20100:2013, 2018.
- [45] M. F. Rosa Iglesias, Asignatura: Sistemas Basados en el Hidrógeno.
- [46] A. D. y X. G., « A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [47] A. Mayyas y M. Mann, «Manufacturing competitiveness analysis for hydrogen refueling stations,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.
- [48] K. Reddi, A. Elgowainy, N. Rustagi y E. Gupta, «Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [49] «El Periódico de la Energía,» [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/javier-brey-aeh2-el-hidrogeno-renovable-ya-es-competitivo-desde-que-la-subasta-de-portugal-fijo-el-precio-en-2-ce-kwh/>.

