

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Estado del Arte de Sistemas de Compresión de
Hidrógeno a Alta Presión

Autor: Emilio Maillo García

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estado del Arte de Sistemas de Compresión de Hidrógeno a Alta Presión

Autor:

Emilio Maillo García

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Estado del Arte de Sistemas de Compresión de Hidrógeno a Alta Presión

Autor: Emilio Maillo García

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A toda persona de la que alguna vez aprendí

Agradecimientos

Todo lo reflejado en este documento se debe mayoritariamente al conocimiento adquirido en estos cuatro años de enseñanza universitaria, por ello estoy enormemente agradecido a todas las personas que directa o indirectamente han sido partícipes de esta formación; al personal docente en primer lugar, ya que de ellos ha dependido directamente la formación que he recibido, a mis compañeros en segundo lugar, por ser ellos quienes me han estado apoyando y haciendo más fácil superar estos cuatro años, y por supuesto también al personal de administración y servicios por su trabajo diario para que todo esto sea posible.

Por supuesto agradecer también a toda mi familia, amigos y círculos más cercanos, a los que están y los que se fueron, por hacer de mí quien soy.

En la actualidad, el futuro energético del planeta es algo incierto debido al acelerado consumo de los recursos energéticos convencionales que algún día se agotarán, por tanto se hace necesaria la investigación de fuentes de energía alternativas. Una fuerte opción que se presenta como alternativa energética en el futuro es el hidrógeno, por ser éste la llave para la completa integración de las energías renovables. No obstante, esta tecnología tiene aún un largo camino por recorrer hasta que se consiga establecer una economía de escala del hidrógeno.

Una de las claves para comenzar a construir esta economía de escala es el desarrollo de los vehículos impulsados por pila de combustible, los cuales almacenan el hidrógeno a alta presión para su posterior consumo.

En el largo camino por recorrer en la tecnología del hidrógeno, uno de los principales cuellos de botella es, precisamente, el elevado coste que supone comprimir el hidrógeno a alta presión, por ser ésta la molécula más pequeña existente en el universo.

Por estas razones, este trabajo tiene como objetivo el estudio del estado actual de la tecnología sistemas de compresión de hidrógeno a alta presión y el análisis de costes enfocado sobre todo al ámbito del repostaje de FCEV en hidrogeneras.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Notación	xvii
1 Introducción a la Tecnología del Hidrógeno	1
1.1. <i>Acerca de la molécula de hidrógeno</i>	1
1.2. <i>Conceptos básicos de la tecnología del hidrógeno</i>	2
1.2.1 Producción	2
1.2.2 Almacenamiento	4
1.3. <i>Situación actual de la tecnología del hidrógeno</i>	5
1.3.1 Producción	5
1.3.2 Almacenamiento	6
1.3.3 Consumo	7
1.3.4 Conclusiones	7
1.4. <i>Retos actuales de la tecnología del hidrógeno</i>	7
1.4.1 Desarrollar métodos de producción no convencionales	7
1.4.2 Incrementar la demanda	7
1.4.3 Fomentar las demostraciones y plantas pilotos	8
1.4.4 Investigar sobre nuevos materiales	8
1.4.5 Reducir la energía necesaria para la compresión y licuación del hidrógeno	8
1.4.6 Fomentar las ventajas del hidrógeno	8
2 Análisis Termodinámico	9
2.1. <i>Propiedades termodinámicas del hidrógeno</i>	9
2.1.1 Densidad	9
2.1.2 Calores específicos	11
2.1.3 Viscosidad	12
2.1.4 Conductividad térmica	12
2.2. <i>Hidrógeno vs. Gasolina en vehículos</i>	13
2.3. <i>Ciclo de compresión</i>	14
2.4. <i>Proceso de compresión del hidrógeno</i>	16
3 Diseños comerciales De Compresores de Hidrógeno	19
3.1. <i>Compresor tipo booster</i>	19
3.1.1 Principio de funcionamiento	20
3.1.2 Clasificación de los compresores tipo booster	21
3.2. <i>Compresores tipo diafragma metálico</i>	25
3.2.1 Principio de funcionamiento	25
4 Estudio de Catálogos	27
4.1. <i>Método de selección</i>	27

4.2. <i>Comparativa de catálogos</i>	28
4.2.1 Haskel	28
4.2.2 PDC Machines	33
4.2.3 Kajitech	35
4.2.4 Toyokoatsu	39
4.2.5 HydroPac	40
4.3. <i>Comparativa de modelos preseleccionados</i>	41
4.3.1 Gastos en términos de energía	42
4.3.2 Gastos económicos	44
5 Diseños no Comerciales	47
5.1 <i>Compresor de líquido iónico</i>	47
5.2 <i>Compresor electroquímico</i>	49
5.3 <i>Compresor de hidruro</i>	51
6 Conclusiones	53
Referencias	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema del reformado por combustibles	Página 3
Figura 1-2 Esquema de la producción de hidrógeno por electrolisis	Página 4
Figura 2-1 Evolución de la densidad del hidrógeno con la presión	Página 12
Figura 2-2 Evolución del C_p del hidrógeno en función de la presión	Página 13
Figura 2-3 Evolución del C_v del hidrógeno en función de la presión	Página 13
Figura 2-4 Evolución de la viscosidad del hidrógeno en función de la presión	Página 14
Figura 2-5 Evolución de la conductividad térmica del hidrógeno con la presión	Página 15
Figura 2-4 Evolución de la viscosidad del hidrógeno en función de la presión	Página 14
Figura 3-1 Compresor tipo booster	Página 20
Figura 3-2 Diagrama P-V de compresión en un compresor tipo booster	Página 21
Figura 3-3 Esquema de un compresor tipo booster	Página 22
Figura 3-4 Esquema de compresor booster monoetapa	Página 23
Figura 3-5 Compresor bietapa con un único pistón primario	Página 24
Figura 3-6 Compresor bietapa con dos pistones secundarios	Página 24
Figura 3-7 Compresor de doble efecto con un solo pistón primario	Página 25
Figura 3-8 Compresor de doble efecto con dos pistones primarios	Página 25
Figura 3-9 Compresor de doble efecto integrado con un compresor bietapa	Página 26
Figura 3-10 Esquema de funcionamiento de un compresor tipo diafragma	Página 27
Figura 3-11 Compresor tipo diafragma instalado con equipos auxiliares	Página 28
Figura 4-1 Catálogo Haskel. Compresores neumáticos serie 5.75"	Página 31
Figura 4-2 Catálogo Haskel. Compresores neumáticos serie 8"	Página 32
Figura 4-3 Catálogo Haskel. Compresores hidráulicos	Página 33
Figura 4-4 Catálogo Haskel. Compresores hidráulicos de elevado caudal	Página 34
Figura 4-5 Compresor tipo diafragma. PDC Machines	Página 36
Figura 4-6 Catálogo PDC Machines	Página 36
Figura 4-7 Compresor KajiTech modelo HyKom400	Página 38

Figura 4-8 Esquema del compresor de KajiTech modelo HyKom400	Página 39
Figura 4-9 Tabla de especificaciones modelo HyKom400 (KajiTech)	Página 39
Figura 4-10 Compresor KajiTech modelo integrado	Página 40
Figura 4-11 Tabla de especificaciones KajiTech modelo integrado	Página 41
Figura 4-12 Oferta de compresores Toyokoatsu	Página 42
Figura 4-13 Compresor modelo C12-40-7000LX (Hydropac)	Página 43
Figura 4-14 Tabla resumen de características de los modelos preseleccionados	Página 44
Figura 5-1 Fotografía de compresor de líquido iónico	Página 48
Figura5-2 Esquema de un compresor de líquido iónico instalado con el separador	Página 48
Figura 5-3 Esquema de compresor electroquímico	Página 49
Figura 5-4 Compresor electroquímico	Página 50
Figura 5-5 Comparativa de consumos de varios procesos de compresión	Página 50
Figura 5-6 Esquema de compresor de hidruros metálicos	Página 51
Figura 5-7 Compresor de hidruro de 3 etapas para isótopos de hidrógeno (620 bar)	Página 51

Notación

PCI	Poder Calorífico Inferior
η	Rendimiento
ρ	Densidad
Nm ³	Normal metro cúbico
E	Energía
E _g	Energía contenida en una cantidad determinada de gasolina
E _H	Energía contenida en una cantidad determinada de hidrógeno
E _e	Consumo específico (Energía empleada en mover 1Nm ³ de hidrógeno)
E _t	Energía total empleada en llenar completamente un depósito de hidrógeno
V _g	Volumen específico de la gasolina
V _H	Volumen específico del hidrógeno
V _d	Volumen total de un depósito de hidrógeno determinado
t	Tiempo empleado en llenar completamente un depósito de hidrógeno
PCI _d	Poder Calorífico Inferior del total del hidrógeno contenido en un depósito
C(€)	Coste total de la producción y compresión del hidrógeno necesario para rellenar completamente un depósito

1 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO

Dejamos de temer lo que comenzamos a entender

- Marie Curie -

El objetivo de este primer capítulo es dar unas nociones sobre el hidrógeno y su potencial en el campo de la ingeniería de la energía, describiendo en primer lugar sus propiedades químicas con el fin de mostrar las razones de su interés energético, y en segundo lugar unas pinceladas sobre los principales campos dentro de la tecnología del hidrógeno y su situación actual.

1.1. Acerca de la molécula de hidrógeno

El hidrógeno, (en griego origen del agua) es el elemento químico más ligero de la tabla periódica, de número atómico 1 y masa atómica 1,00794 uma. Se presenta por lo general en su forma molecular diatómica H_2 (En adelante la palabra hidrógeno se referirá a dicha forma molecular).

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo, conformando aproximadamente el 75% de la materia de este, no obstante, en la tierra solo se encuentra en ciertas capas de la atmósfera, es decir, no podemos obtener el hidrógeno en estado libre directamente de la naturaleza, por lo que se necesita producir de manera industrial a partir de ciertos compuestos como el gas natural o el agua.

Actualmente el hidrógeno se utiliza mayoritariamente con fines no energéticos como pueden ser la producción de amoníaco o la hidrogenación de grasas.

Sin embargo, en los últimos años se está contemplando al hidrógeno desde el punto de vista energético. El creciente interés por el hidrógeno como futuro vector energético es consecuencia de sus múltiples propiedades citadas a continuación.

- Su elevado Poder Calorífico Inferior (PCI) 120 MJ/kg lo que representa 2,79 veces el PCI de la gasolina, siendo este de 42,89 MJ/kg.
- Ausencia de emisiones contaminantes, siendo el H₂O el único producto de la combustión del H₂ puro.
- Posibilidad de obtener directamente energía eléctrica mediante una pila de combustible, sin necesidad de utilizar una máquina térmica, evitando así el rendimiento límite de Carnot.
- En caso de fuga, el hidrógeno se disipa rápidamente debido a su baja densidad, disminuyendo así el riesgo de explosión y los posibles daños originados por su combustión accidental.

No obstante, existen otras propiedades que dificultan el avance de la tecnología del hidrógeno.

- Al ser el elemento más pequeño, se fuga fácilmente a través de ciertos materiales, lo cual conlleva una utilización de materiales específicos para su transporte y almacenamiento.
- Se combina con el oxígeno del aire sin necesidad de energía de activación en un amplio rango de concentraciones dando lugar a una reacción de combustión con una cinética muy elevada (Límite de explosión 4% - 75%).
- En estado gaseoso es incoloro e inodoro y al producirse la combustión, la llama es invisible a la luz del día, lo que dificulta la detección de fugas.
- Su densidad es extremadamente reducida (0,0899 kg/ Nm³ en estado gaseoso y 0,0708 kg/l en estado líquido), esto penaliza la entalpía disponible por unidad de volumen. Siendo ésta menor que la de los combustibles convencionales.
- Al tener una densidad tan reducida se necesita un aporte de energía mayor para comprimirlo a altas presiones.

1.2. Conceptos básicos de la tecnología del hidrógeno

En esta sección se describen los principios de funcionamiento de los principales métodos de producción y almacenamiento de hidrógeno en la actualidad con el fin de familiarizar al lector con las diferentes ramas de la tecnología del hidrógeno.

1.2.1. Producción

Existen diversos métodos de producción de hidrógeno en la actualidad; siendo los más importantes actualmente el reformado por combustibles, la electrolisis y los ciclos termoquímicos, los cuales se describen en esta sección.

1.2.1.1. Reformado por combustibles

El proceso de reformado por combustibles se basa en la producción de hidrógeno partir de un hidrocarburo, generalmente metano obtenido del gas natural, aplicándole a éste los siguientes tratamientos:

- Purificación: para eliminar impurezas contenidas en el gas natural como el cloro y el azufre.
- Producción primaria de H_2 : a temperaturas altas y con ayuda de catalizadores, el combustible reacciona, generalmente con vapor de agua (steam reforming), dando lugar a CO y H_2
- Producción secundaria de H_2 : en esta etapa se hace reaccionar el CO producido en la producción primaria con más vapor de agua, produciéndose así CO_2 y H_2 .
- Purificación del H_2 : este proceso consiste en desulfurar la corriente de H_2 producida y oxidar el CO remanente convirtiéndolo así en CO_2

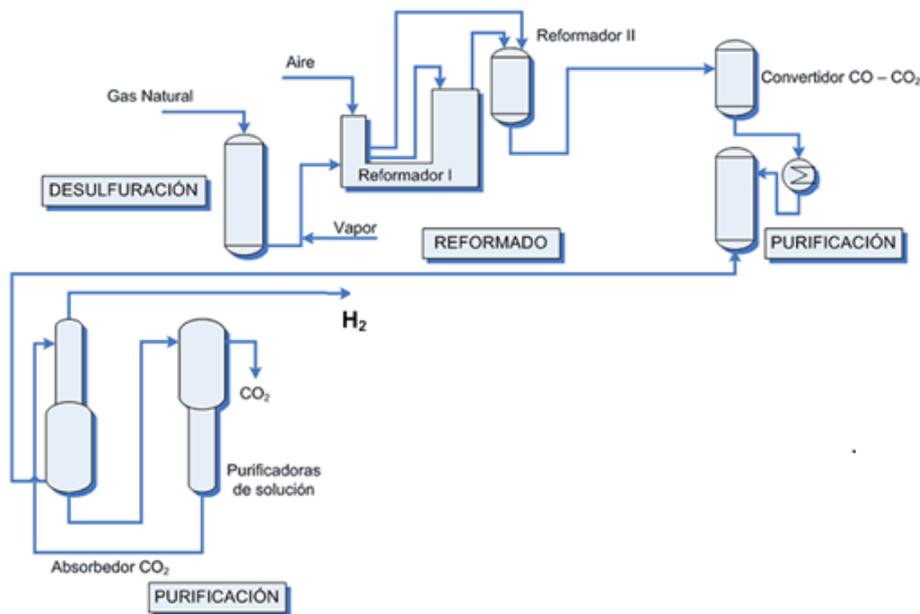


Figura 1-1 Esquema del Reformado por Combustibles

Resulta evidente que este proceso de producción carece de interés desde el punto de vista energético, ya que el hidrógeno producido tendrá una entalpía menor que el combustible utilizado, es decir, se pierde energía en el proceso y por tanto sería más provechoso utilizar directamente el combustible. Además, este proceso no elimina la emisión de gases contaminantes ni puede contemplarse en un escenario futuro con escasez de combustibles fósiles.

No obstante sigue siendo el proceso de producción más utilizado debido a que la demanda actual de hidrógeno se basa en usos no energéticos.

1.2.1.2. Electrolisis

La electrolisis se define como el proceso por el cual el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno

Este proceso se basa en aplicar al agua una diferencia de potencial de 1,23V, con ayuda de un electrolizador, que se compone básicamente de un ánodo, un cátodo y una membrana que separa ambos. Al aplicar esta diferencia de potencial, el agua se disocia, dando lugar a oxígeno gaseoso en el ánodo, e hidrógeno gaseoso en el cátodo.

La electrolisis del agua es un método simple de producir hidrógeno y se presenta como la mejor opción de producir hidrógeno con fines energéticos a medio plazo.

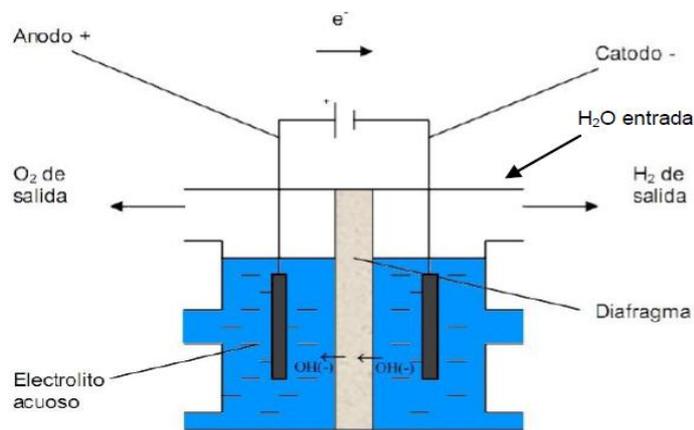


Figura 1-2 Esquema de la producción de hidrógeno por electrolisis

Cabe resaltar que debido al segundo principio de la termodinámica, la energía empleada en la producción de hidrógeno es necesariamente mayor a la que se podrá extraer del hidrógeno producido, no obstante, el interés de la electrolisis radica en producir la electricidad consumida por el electrolizador a partir de energías renovables.

1.2.1.3. Ciclos termoquímicos

Este sistema de producción de hidrógeno relativamente novedoso, basado en la termólisis directa del agua, proceso por el cual el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno a temperaturas muy altas ($T > 2500\text{K}$)

La manera de conseguir esta temperatura es el diseño de un ciclo termoquímico, generalmente alimentado por energía solar de concentración.

1.2.2. Almacenamiento

Se describirán en los apartados de esta subsección los tres principales sistemas de almacenamiento de hidrógeno como son el almacenamiento a presión, almacenamiento líquido y en hidruros metálicos.

1.2.2.1. Almacenamiento a presión

Se trata de una tecnología estudiada, madura y de gran interés, que trata de paliar la baja densidad energética por unidad de volumen propia del hidrógeno buscando comprimir el hidrógeno producido a muy altas presiones, de ahí la necesidad de implementar sistemas de compresión de hidrógeno que sean capaces de trabajar a muy altas presiones con un consumo razonable.

No obstante este sistema cuenta también con varios inconvenientes, que se indican a continuación:

La baja densidad energética por unidad de volumen que continúa teniendo el hidrógeno incluso a presiones superiores a los 700 bar, por lo que todavía se necesitan desarrollar equipos capaces de aumentar aún más la presión, así como materiales capaces de soportar esta presión en su interior.

Otro hándicap es el alto coste que supone la compresión al ser el hidrógeno una molécula tan pequeña y ligera, por tanto es necesario desarrollar la tecnología de compresión de hidrógeno con el

fin de hacer de este sistema de almacenamiento una tecnología competitiva en el mercado.

1.2.2. Almacenamiento líquido

Esta tecnología supera el obstáculo de la baja densidad energética del hidrógeno, no obstante el consumo de licuar hidrógeno es muy superior a cualquier otro sistema de almacenamiento, siendo este consumo en energía eléctrica el 33% del PCI del hidrógeno producido; Además las pérdidas térmicas se hacen muy importantes ahora ya que el hidrógeno líquido se encuentra solo a muy bajas temperaturas (-252,76°C a 1 atm)

Se estima que esta tecnología podrá ser competitiva cuando se consiga reducir el consumo por debajo del 20% del PCI

Debido a los elevados costes que supone esta tecnología, las aplicaciones se reducen a aquellas que el factor económico no es limitante y no existe otra solución, por ejemplo en propulsión espacial y criogenia.

1.2.3. Almacenamiento en hidruros metálicos

Este método de almacenamiento utiliza compuestos metálicos que en ciertas condiciones de presión y temperatura presentan la capacidad de combinarse con el hidrógeno en una reacción más o menos reversible y con una cinética limitada.

Este tipo de almacenamiento es interesante en aplicaciones donde el peso y el volumen de almacenamiento no sean factores limitantes, es decir, en aplicaciones estacionarias.

1.2.3. Consumo

La manera en que se consume el hidrógeno es sin duda de vital importancia en cuanto al desarrollo de su tecnología. En cuanto al consumo energético se refiere, la manera más efectiva de utilizar el hidrógeno es a través de una pila de combustible.

El principio de funcionamiento de una pila de combustible se basa en el proceso inverso al electrolizador, es decir, hacer pasar una corriente de hidrógeno por un ánodo y una de oxígeno por un cátodo de tal manera que al combinarse genere una corriente eléctrica.

1.3. Situación actual de la tecnología del hidrógeno

La tecnología del hidrógeno se encuentra aún en desarrollo y tiene un largo camino por recorrer, en esta sección se describe hasta donde se han desarrollado hasta hoy las distintas ramas de ésta tecnología y como se espera que esté enfocado su desarrollo en el futuro.

1.3.1. Producción

En la actualidad se producen anualmente más de 50 millones de toneladas de hidrógeno en todo el mundo, siendo el 80% de esta producción a partir de reformado de metano, obtenido a partir de la purificación del gas natural.

Como ya hemos apuntado anteriormente, este proceso es energéticamente ineficiente y en adición, emite gases de efecto invernadero como el CO₂, no obstante su interés se basa en los usos no energéticos del hidrógeno.

No obstante actualmente se está desarrollando el uso energético del hidrógeno, por tanto, se busca desarrollar métodos de producción interesantes desde este punto de vista.

Actualmente el único método de producción con fines energéticos que se encuentra en el mercado es la electrólisis, que a pesar de que requiere más energía de la que podría aportar el hidrógeno producido, es la opción más interesante en la actualidad debido a la posibilidad de emplear energías renovables, o excesos de energía para su producción.

Otro método de producción interesante es la termólisis a partir de ciclos termoquímicos con energía solar, sin embargo a pesar de existir 115 diseños de ciclos de este tipo, no existe aún ninguna planta piloto que implemente este sistema, no obstante se presenta como una solución interesante a medio-largo plazo.

1.3.2. Almacenamiento

En aplicaciones estacionarias que requieren una potencia menor a 30 kW en las cuales el peso no es un factor limitante y en las que el hidrógeno será almacenado solamente durante algunas semanas, un tipo de almacenamiento interesante es el de hidruros metálicos, el cual se considera el método más seguro para almacenar hidrógeno.

No obstante presenta una serie de problemas relacionados con el deterioro del nicho metálico, la fragilización y la baja densidad de almacenamiento.

En aplicaciones móviles y otras que necesiten una alta densidad de almacenamiento y un peso más reducido se utilizan el almacenamiento gaseoso a presión o el almacenamiento licuado.

El almacenamiento licuado necesita temperaturas muy reducidas, cercanas a los 20K y por lo que la cantidad de energía que se requiere en este proceso resulta muy elevada, sin contar por otra parte las enormes pérdidas térmicas derivadas de mantener el hidrógeno almacenado a temperaturas tan bajas lo que aumenta aún más los costes asociados a esta tecnología.

Es por esta serie de razones que el almacenamiento licuado no es interesante a nivel de mercado, no obstante al obtener una densidad alta de hidrógeno se suele utilizar en aplicaciones a gran escala que requieren más de 100 MW , en el ámbito aeroespacial entre otros, donde el factor económico no es el más relevante.

Es interesante apuntar que se estima que esta tecnología podrá ser competitiva cuando se consiga reducir el consumo de energía del proceso por debajo del 20% del PCI del hidrógeno tratado.

En el caso de aplicaciones móviles donde la economía juega un papel importante, por ejemplo en los vehículos eléctricos impulsados por pila de combustible (FCEV por sus siglas en inglés) o para almacenamiento a medio-largo plazo en aplicaciones de hasta 300kW, el almacenamiento gaseoso en recipientes a presión es sin duda el más interesante actualmente.

En la actualidad el hidrógeno se envasa en botellas a 700 bar generalmente, consumiéndose en este proceso de compresión de media el 13% del PCI del hidrógeno comprimido, lo cual supone una pérdida muy significativa y hace del proceso de compresión y almacenamiento un cuello de botella que dificulta el desarrollo comercial de los FCEVs.

Actualmente se están investigando nuevas formas de almacenamiento de hidrógeno como son las microsferas de vidrio y nanotubos de carbono, aunque aún no se han llegado a utilizar en ninguna aplicación real.

1.3.3. Consumo

Actualmente el hidrógeno se consume mayoritariamente para fines no energéticos como son: producción de amoníaco, hidrogenación de grasas, aplicaciones criogénicas, etc.

Como consecuencia a esto, la producción de hidrógeno predominante es la de reformado por combustibles, quedándose atrás el desarrollo de las tecnologías enfocadas a la producción del hidrógeno con fines energéticos.

No obstante, actualmente se le viene dando un enfoque diferente al hidrógeno, con la intención de que en el futuro se utilice para gran parte de las aplicaciones energéticas que conocemos hoy en día, principalmente para el transporte.

1.3.4. Conclusiones

Como ya se ha visto, en la actualidad se produce y consume anualmente una gran cantidad de hidrógeno en todo el mundo, no obstante esta economía del hidrógeno no tiene un enfoque energético.

Si queremos aspirar a utilizar el hidrógeno como vector energético en el futuro, es necesario comenzar la construcción de una economía energética del hidrógeno, en la cual se rompa la dependencia de los combustibles fósiles para producir hidrógeno, recurriéndose de esta manera a la producción por electrólisis a partir de fuentes de energía renovable o nuclear, y al desarrollo de ciclos termoquímicos para la producción de hidrógeno a través de termólisis.

Un claro camino a seguir para desarrollar una gran economía de escala a nivel mundial sería conseguir mejorar la densidad energética del hidrógeno en términos de volumen, consiguiendo así almacenar una mayor cantidad de hidrógeno en un volumen más reducido y con un peso menor y hacer del almacenamiento a presión una tecnología competitiva.

La importancia de hacer de los sistemas de compresión y almacenamiento de hidrógeno a presión una tecnología competitiva radica en la implicación que tendría en la reducción del coste de repostaje de un FCEV así como en el aumento de su autonomía, lo cual conllevaría un enorme nicho de demanda de hidrógeno, lo cual ayudaría a aumentar su producción con fines energéticos y a conseguir la buscada economía de escala del hidrógeno.

1.4. Retos actuales de la tecnología del hidrógeno

Como ya se ha comentado, la tecnología del hidrógeno se encuentra aún en desarrollo ya que tiene que superar ciertas barreras que hoy en día impiden la implementación de una economía del hidrógeno a escala.

1.4.1. Desarrollar los métodos de producción no convencionales

El coste de producción de una unidad energética de hidrógeno sigue siendo aún muy elevado en comparación con las energías convencionales, esto se debe fundamentalmente al hecho de que actualmente el hidrógeno se produce mayoritariamente a partir de combustibles fósiles, por lo tanto, el precio final será más elevado que el de dichos combustibles.

En adición a esto, los métodos de producción de hidrógeno extendidos actualmente emiten grandes cantidades de CO₂, por tanto no son compatibles con una economía de hidrógeno de emisiones cero.

1.4.2. Incrementar la demanda

Actualmente existe una demanda muy reducida de hidrógeno a nivel mundial, siendo la mayor parte de esta demanda para usos no energéticos.

Esto nos conduce al dilema del huevo y la gallina. Una nueva fuente de energía como es el hidrógeno, encuentra muy limitado su desarrollo si existen muy pocas aplicaciones que demanden éste hidrógeno. Sin embargo no es posible que crezca fuertemente ésta demanda si no existe una tecnología de producción de hidrógeno asequible, fiable y consolidada a nivel mundial.

Por tanto, una forma de potenciar el desarrollo de una tecnología del hidrógeno competitiva es fomentar tanto la producción como el uso de aplicaciones que demanden este hidrógeno.

1.4.3. Fomentar las demostraciones y plantas piloto

Actualmente la falta de conocimiento general sobre la tecnología del hidrógeno limita la inversión en ésta tecnología y por tanto su crecimiento.

Las aplicaciones reales son la mejor manera de ganar confianza para que inversores y fabricantes apuesten por el desarrollo de ésta tecnología y se tenga un camino a seguir.

1.4.4. Investigar sobre nuevos materiales

Los materiales existentes comprenden un factor limitante en cuanto al desarrollo de la tecnología del hidrógeno se refiere sobre todo en el campo del almacenamiento, además ser necesario también investigar otros materiales más aptos por ejemplo para las membranas y catalizadores de los electrolizadores o materiales resistentes a altas temperaturas para ciertos tipos de compresores.

1.4.5. Reducir de la energía necesaria para la compresión y licuación del hidrógeno

El hidrógeno al ser la molécula más pequeña, es también la menos densa, y esto dificulta en gran medida su proceso de compresión.

Actualmente durante el proceso de compresión a 700 bar, se consume de media en energía eléctrica el 13% del PCI del hidrógeno producido, y el 33% en el caso del proceso de licuación.

Por tanto el proceso de compresión o licuación son uno de los principales cuellos de botella en cuanto a la tecnología del hidrógeno se refiere.

1.4.6. Fomentar las ventajas del hidrógeno

Actualmente en el mundo, la tecnología del hidrógeno es bastante desconocida por la sociedad, y existen muchos falsos mitos, sobre todo en temas de seguridad.

En una sociedad en la cual se conocen las ventajas del hidrógeno y se conozcan las medidas de seguridad de su tecnología, sería mucho más fácil introducir una economía de escala ya que las personas tendrían una predisposición mayor a hacer uso de esta tecnología.

Es por tanto necesario dar a conocer las múltiples ventajas de esta tecnología al público con el fin de que conozcan las posibles aplicaciones y educarlos en materia de seguridad.

2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Divide las dificultades que examinas en tantas partes
como sea posible para su mejor solución

- René Descartes -

Puesto que este trabajo trata de profundizar en el proceso de compresión del hidrógeno, a continuación se estudian distintas propiedades del hidrógeno que justifican la importancia de almacenarlo a alta presión, así como su dificultad para conseguirlo.

2.1. Propiedades termodinámicas del hidrógeno

El objeto de esta sección es mostrar de forma cualitativa, las principales propiedades termodinámicas del hidrógeno, tanto en condiciones estándar ($T=298\text{K}$, $p=1\text{bar}$) como su evolución a diferentes presiones, así como analizar la manera en que pueden afectar al proceso de compresión.

Las propiedades que analizaremos a continuación son: densidad, calor específico a volumen constante (C_v) y a presión constante (C_p), relación de calores específicos (γ), conductividad térmica y viscosidad.

2.1.1. Densidad

La densidad es la propiedad de mayor interés en cuanto a las aplicaciones energéticas del hidrógeno se refiere ya que es el principal inconveniente del hidrógeno gaseoso frente a otros combustibles. Por ello se estudia a continuación la evolución de la densidad con la presión.

Densidad en condiciones estándar $\rho=0.0893\text{ kg/m}^3$.

A continuación se muestra la evolución de la densidad del hidrógeno desde los 0 bar hasta los 700 bar.

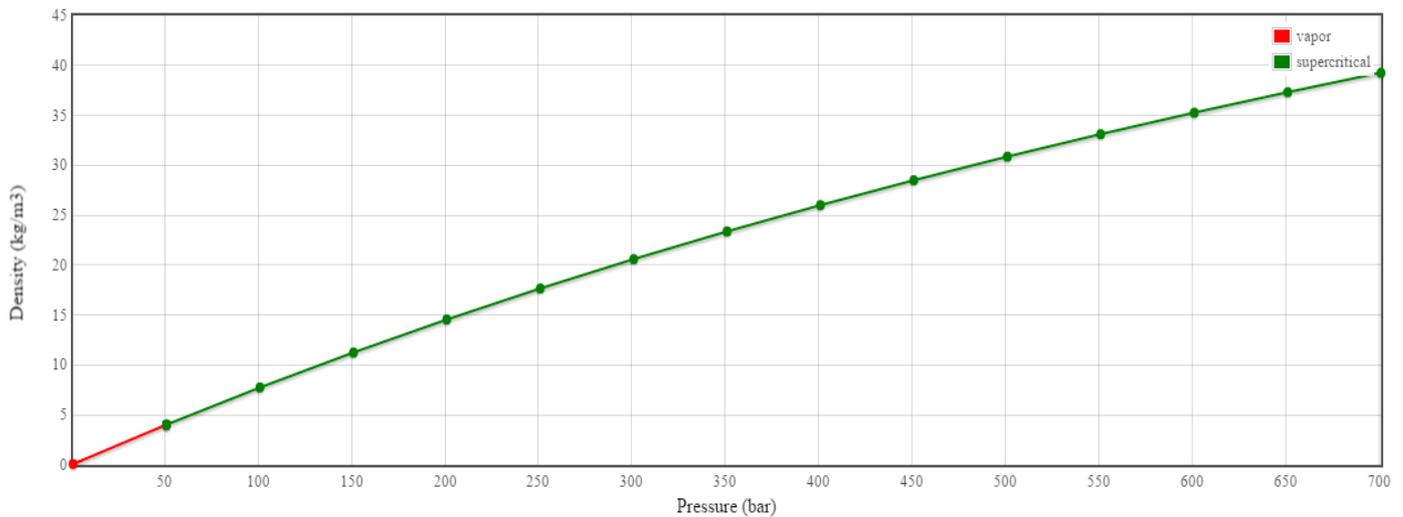


Figura 2-1 Evolución de la densidad del hidrógeno con la presión

El interés de aumentar la densidad del hidrógeno radica en aumentar su PCI por unidad de volumen para poder almacenar una cantidad considerable de energía en un depósito relativamente pequeño.

En cuanto a la densidad se observa que tiene un crecimiento casi constante conforme aumenta la presión, no obstante este crecimiento es cada vez menor, lo cual se traduce en un handicap más para los sistemas de compresión a alta presión, debido a que conforme aumenta la presión, conseguiremos cada vez un aumento menor de la densidad, y por tanto, se consumirá cada vez más energía por cada kg/m³ extra. Este aumento puede resultar en no hacer rentable la producción de hidrógeno a presiones muy elevadas, por lo que se debe tener en mente este factor para llegar a una solución de compromiso para cada aplicación.

2.1.2. Calores específicos

Otro factor determinante en el proceso de compresión del hidrógeno es la relación de calores específicos $\gamma = C_p/C_v$.

Por tanto, analizaremos a continuación la evolución de estos dos parámetros en relación a la presión.

$$C_p(1\text{bar}, 298\text{K}) = 0.0288 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$$

$$C_v(1\text{bar}, 298\text{K}) = 0.0205 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$$

$$\gamma = C_p/C_v = 1.4054$$

Los gráficos mostrados a continuación representan la evolución de los parámetros C_p y C_v con la presión.

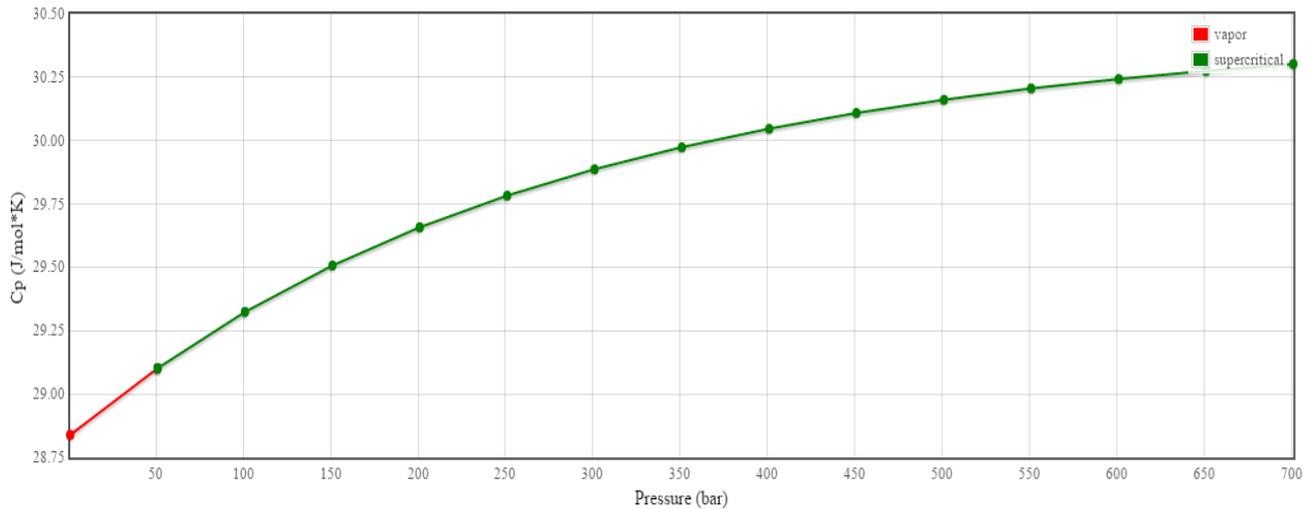


Figura 2-2 Evolución del Cp del hidrógeno en función de la presión

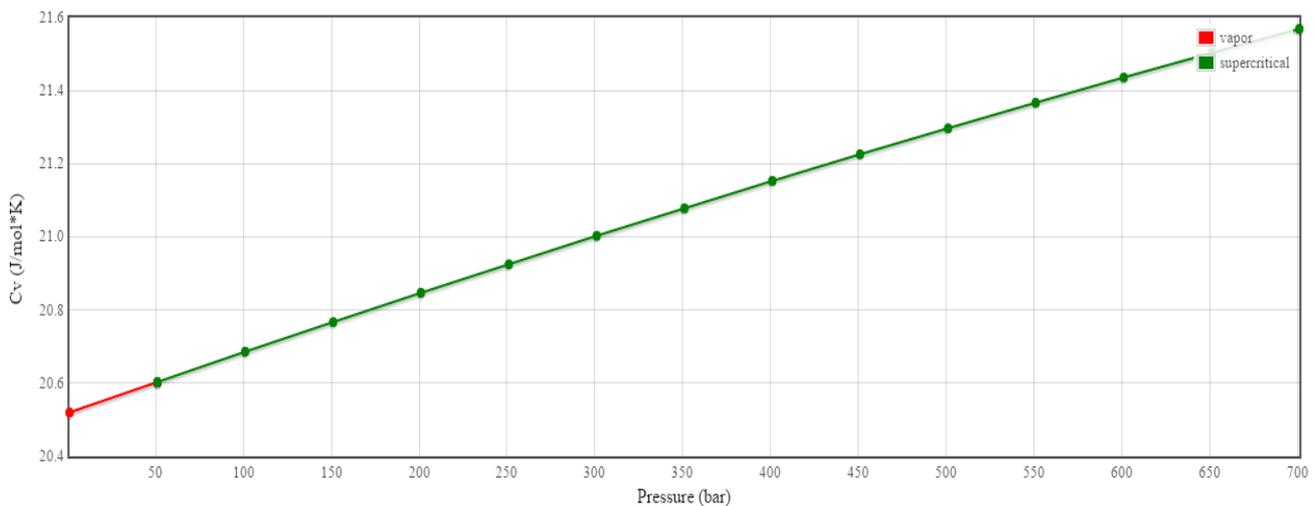


Figura 2-3 Evolución del Cv del hidrógeno en función de la presión

En ambos parámetros se observa un aumento considerable, lo cual es positivo desde el punto de vista del proceso de compresión, ya que la temperatura aumentará más lentamente a medida que aumente la presión de trabajo, y esto repercutirá en una ralentización del aumento de las pérdidas térmicas y en una mayor aproximación al proceso isoterma.

Por otra parte, analizando las gráficas conjuntamente, observamos un mayor crecimiento absoluto en el parámetro Cp, no obstante, este crecimiento se hace cada vez menor conforme aumentamos la presión del hidrógeno. Sin embargo el crecimiento del parámetro Cv es aproximadamente lineal.

Este crecimiento desparejado tiene repercusión en el parámetro γ , y como ya veremos en secciones posteriores, este parámetro será determinante en cuanto a la cantidad de trabajo a aportar para comprimir el hidrógeno.

Analizando la variación de los calores específicos, se observa que su cociente (γ) disminuye levemente a altas presiones. Se analizará que efecto tiene esta disminución y su significancia en la sección dedicada al ciclo de compresión.

2.1.3. Viscosidad

Otro parámetro a tener en cuenta a la hora de comprimir un gas es la viscosidad, ya que dependiendo de ésta, el fluido ofrecerá más o menos resistencia al movimiento del compresor, de manera que afectará a las pérdidas mecánicas y por lo tanto al rendimiento del compresor.

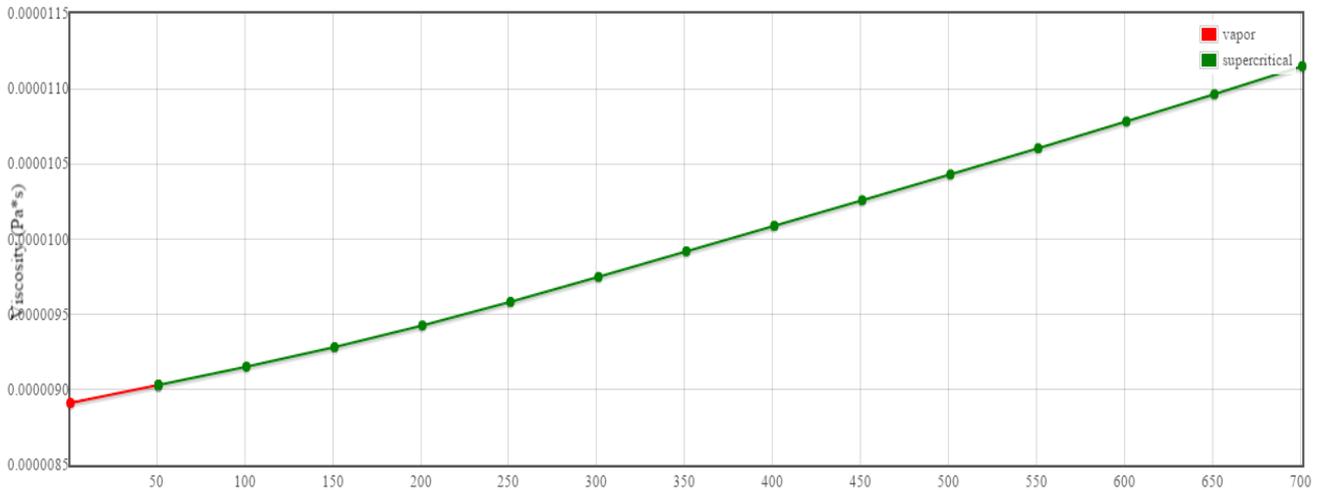


Figura 2-4 Evolución de la viscosidad del hidrógeno en función de la presión

Se observa que la viscosidad aumenta con la presión, con lo que debe ser tenida en cuenta, a la hora de fijar la presión óptima de una aplicación, ya que a mayor viscosidad menor será el rendimiento mecánico del compresor.

2.1.4. Conductividad térmica

En último lugar analizaremos la conductividad térmica del hidrógeno, factor importante en cuanto a la velocidad con la que puede cambiar la temperatura del gas.

El interés de estudiar este parámetro radica en la común solución de dividir del proceso de compresión en varias etapas, donde el gas es refrigerado entre dichas etapas. De esta forma, al aumentar la conductividad térmica, el gas tendrá una mejor transferencia de calor, y por tanto se refrigerará más fácilmente,

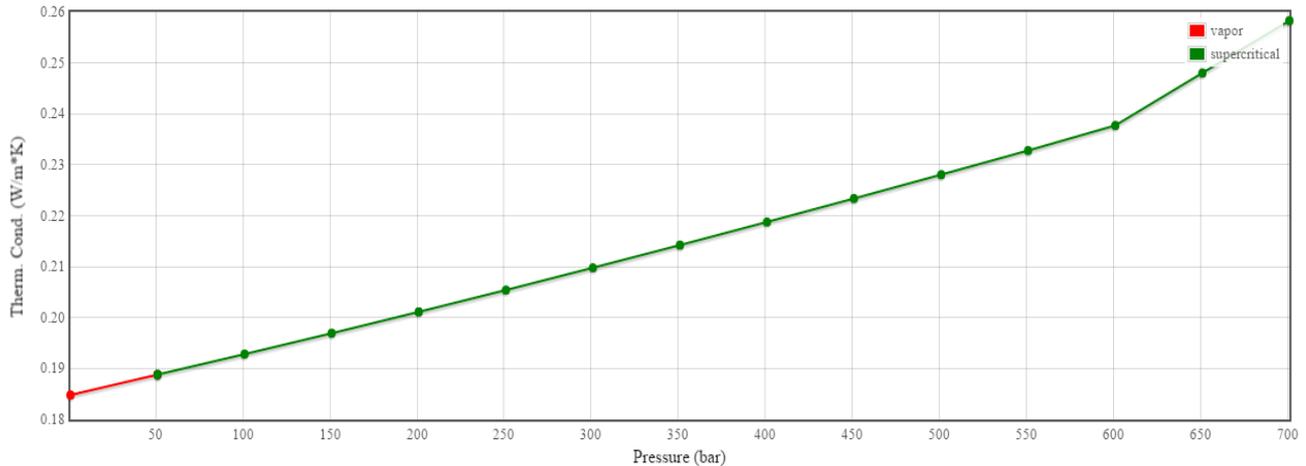


Figura 2-5 Evolución de la conductividad térmica del hidrógeno con la presión

Se observa que conforme aumenta la presión, no solo aumenta la conductividad del hidrógeno, sino que a presiones por encima de los 600 bar, el crecimiento se hace más pronunciado, por lo cual la refrigeración del hidrógeno se hará más sencilla a altas presiones.

Por otra parte, si recordamos también el aumento del C_p del hidrógeno con la presión, éste indicaba que a altas presiones se necesita extraer del hidrógeno más energía por cada grado que queramos disminuir su temperatura, no obstante, este crecimiento era cada vez menor hasta que el C_p se hacía prácticamente constante.

Se concluye entonces que trabajar a altas presiones favorece la refrigeración entre etapas, acercando el proceso de compresión al proceso isoterma ideal y mejorando por tanto el rendimiento de la compresión.

2.2. Hidrógeno vs. Gasolina en vehículos

Como ya se explicó en el capítulo anterior, las dos propiedades que hacen del hidrógeno una posible alternativa energética son: en primer lugar, su elevado PCI, y en segundo, la capacidad de obtener energía eléctrica directamente del hidrógeno con ayuda de una pila de combustible sin necesidad de utilizar una maquina térmica, evitando así el rendimiento máximo teórico de Carnot.

Los cálculos expuestos a continuación nos permiten cuantificar las diferencias de energía mecánica por kilogramo entre un motor térmico alimentado por gasolina y un motor eléctrico alimentado por pila de combustible.

De un motor de gasolina ($PCI = 42,89 \text{ MJ/kg}$), para el cual se tomará un rendimiento $\eta = 0,35$ sería capaz de producir una energía mecánica total de $E = 42,89 * 0,35 = 15,01 \text{ MJ}$ por cada kilogramo de gasolina.

Del mismo modo un vehículo impulsado a partir de hidrógeno ($PCI = 120 \text{ MJ/kg}$) a través de un motor eléctrico con un rendimiento $\eta = 0,9$ alimentado por una pila de combustible $\eta = 0,7$ (Rendimiento global del sistema $\eta = 0,63$), Produciría $E = 0,7 * 0,9 * 120 = 75,6 \text{ MJ}$ por cada kilogramo de hidrógeno.

Comparando estos dos resultados obtenemos que: $E_g/E_H = 5,037$.

Esto, aplicado a dos vehículos a los cuales se les supone un mismo rendimiento mecánico y una autonomía similar, el vehículo de hidrógeno consumiría 5 veces menos combustible, en términos de masa, que otro vehículo con motor de gasolina.

Sin embargo uno de los conocidos inconvenientes del hidrógeno es su baja densidad ($\rho_H=0,0899 \text{ kg/Nm}^3$), con lo cual, en términos de volumen el hidrógeno pierde interés frente a otros combustibles.

Si continuamos comparando un vehículo impulsado con hidrógeno con otro impulsado por gasolina, para la misma autonomía, en condiciones normales ($T=0^\circ\text{C}$, $p=1\text{atm}$) y utilizando los resultados previos, obtenemos lo siguiente:

$$5,037 \text{ kg de gasolina} / 680 \text{ (kg/m}^3) = 0,0074 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ kg H}_2 / (0,0899 \text{ kgH}_2/\text{m}^3) = 11,12 \text{ m}^3 \quad 5,037 \text{ kg de gasolina} / 680 \text{ (kg/m}^3) = 0,0074 \text{ m}^3$$

Por lo tanto la relación de volúmenes sería $V_H/V_g = 1502,7$. Lo cual nos indica que, para una misma autonomía, a pesar del elevado poder calorífico del hidrógeno y la posibilidad de un aprovechamiento energético más eficiente, necesitaríamos un depósito 1500 veces mayor al equivalente en términos de gasolina, lo cual hace completamente necesario un almacenamiento a alta presión para aplicaciones móviles.

De la misma manera que y tomando una presión de 700 bar, tenemos que $\rho_H=62,93 \text{ kg/m}^3$, por tanto 1 kg de hidrógeno ocuparía un volumen de:

$$1 \text{ kg H}_2 / (62,93 \text{ kg/m}^3) = 0,016 \text{ m}^3$$

Lo cual nos da una nueva relación de volúmenes $V_H/V_g = 2,16$.

Teniendo en cuenta un vehículo de gasolina con un depósito de combustible de 50 l, para un coche de hidrógeno con una autonomía similar, necesitaríamos un depósito de 108 l, que a pesar de ser un gran tamaño, comienza a ser viable.

De esta manera se observa que el almacenamiento de hidrógeno no es el principal factor limitante de esta tecnología, sino que el mayor obstáculo al que se enfrenta es la gran cantidad de energía que se necesita para llevar el hidrógeno a alta presión.

En las secciones siguientes se hablará acerca de los consumos energéticos en los procesos de compresión de hidrógeno comparándose este con un ciclo de compresión de aire.

2.3. Ciclo de compresión.

En esta sección se pretende ilustrar tanto física como matemáticamente, el proceso de compresión genérico.

Puesto que este documento se desarrolla con base en los sistemas de compresión a altas presiones, nos centraremos a continuación en analizar exclusivamente los procesos de compresión volumétricos, por ser estos los únicos capaces de conseguir las presiones que buscamos.

Con el fin de facilitar la explicación, se usará como apoyo a ésta, un compresor tipo pistón convencional, no obstante, todo lo que se exponga es extrapolable a cualquier otra máquina volumétrica.

Con ayuda del siguiente diagrama se mostrarán las etapas de un proceso de compresión volumétrica:

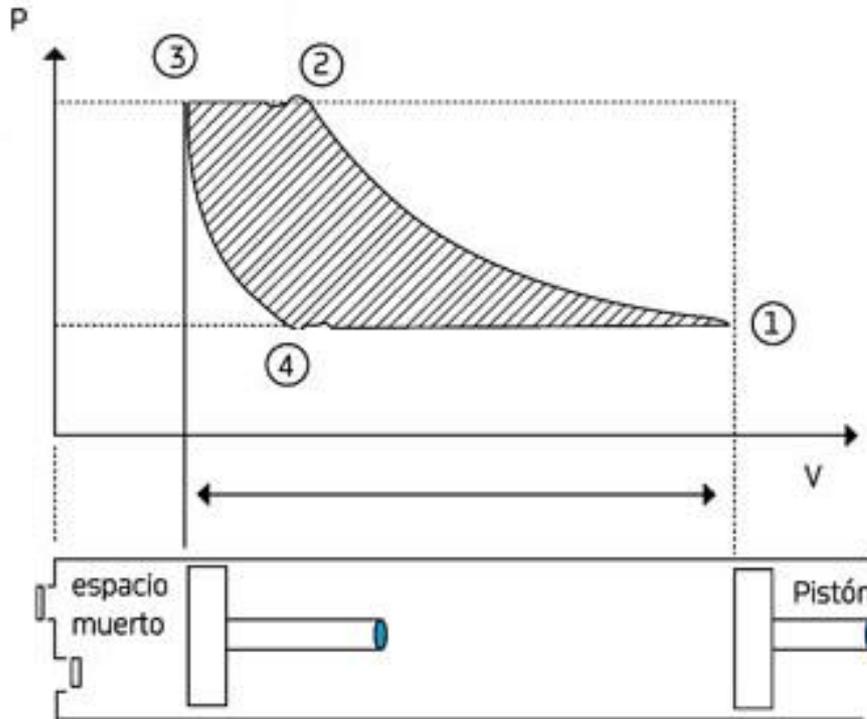


Figura 2-6 Ciclo de compresión volumétrico

Desde el punto de vista del fluido se distinguen cuatro etapas:

- Etapa 1-2: El pistón, lleno de gas, comienza a subir con la válvula de escape aún cerrada, aumentando así la presión del fluido de trabajo contenido en su interior.
- Etapa 2-3: En el punto 2 se abre la válvula de escape y el gas sale a presión constante hasta que el pistón alcanza su punto muerto superior (PMS) en el punto 3.
- Etapa 3-4: El pistón comienza a descender y el volumen de la cámara aumenta a medida que baja la presión de la misma hasta que se abre la válvula de admisión en el punto 4.
- Etapa 4-1: El volumen de la cámara sigue aumentando mientras el fluido de trabajo va llenando todo el espacio a presión aproximadamente constante hasta que el émbolo llega al punto muerto inferior (PMI)

A continuación se encuentran las ecuaciones que permiten calcular la energía aportada al fluido por el compresor en el supuesto de que dicho proceso se lleve a cabo de manera isentrópica.

$$W_{12} = P_1 V_1 \frac{1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]$$

$$W_{23} = P_2 (V_3 - V_2)$$

$$W_{34} = P_3 V_3 \frac{1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

$$W_{41} = P_1 (V_1 - V_4)$$

Para calcular el trabajo total que se aporta al fluido basta con sumar las cuatro etapas

$$Wt = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$$

Desarrollando esta expresión llegamos a:

$$Wt = P_1 V_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) + r \frac{V_3}{V_1} \left(1 - r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right]$$

Siendo r la relación de compresión $r = \frac{P_2}{P_1}$; y siendo γ la relación de calores específicos:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Como ya se apuntó previamente, estas ecuaciones hacen referencia a la energía que absorbe el fluido de trabajo. Si queremos conocer el consumo de energía del compresor bastará con dividir esta energía entre el rendimiento global, que dependerá de su diseño y características constructivas principalmente.

2.4. Proceso de compresión del hidrógeno

En esta sección se analizará termodinámicamente el proceso de compresión de hidrógeno en un compresor tipo pistón y tomando como referencia el proceso de compresión del aire.

Para este análisis, y con el fin de facilitar la comparativa entre ambos fluidos, se supondrá que los gases se comprimen de manera isentrópica. A continuación se muestra una figura que ilustra el proceso de compresión de un gas genérico en un compresor de cuatro tiempos tipo pistón y los cálculos que permiten calcular la energía que aporta el compresor al gas tratado en un ciclo completo.

$$Wt = P_1 V_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) + r \frac{V_3}{V_1} \left(1 - r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right]$$

En esta ecuación se distinguen claramente dos tipos de parámetros: los que dependen exclusivamente del compresor y su régimen de operación (P , V y r), y, por otra parte, γ , que depende del gas de trabajo y las condiciones a las que éste se encuentre.

Se asumirá que, tanto en el caso del aire como en el caso del hidrógeno, los parámetros que dependen del tipo de compresor serán idénticos, así como sus rendimientos, los cuales no se incluyen en la ecuación.

En el caso de la relación de calores específicos, al ser ambos gases diatómicos, se tiene que la relación de calores específicos de ambas sustancias es muy parecida, siendo $\gamma_a = 1.4018$ en el caso del aire y $\gamma_h = 1.4054$ para el hidrógeno.

Por tanto, para las mismas presiones de entrada y salida, el trabajo aportado por el compresor en cada ciclo será muy parecido en ambos casos.

Sin embargo, como ya se ha apuntado, el hidrógeno resulta ser muy poco denso, con lo cual, el gasto másico de hidrógeno que se mueve en cada ciclo de compresión resulta mucho menor que en el caso del aire.

Recordamos que la densidad del hidrógeno gaseoso es de $\rho_H = 0.0899 \text{ kg/Nm}^3$ mientras que el valor de la densidad del aire es $\rho_A = 1.29 \text{ kg/Nm}^3$. Por tanto su relación de densidades será $\rho_A/\rho_H = 14.35$.

Esta relación de densidades se traduce en que para mover la misma cantidad de ambos gases se necesitan unos 14 ciclos en un compresor de hidrógeno por cada ciclo de compresión de aire. Es decir, un compresor de hidrógeno consumiría aproximadamente 14 veces más que otro de aire que trabaje en las mismas condiciones y mueva el mismo gasto.

Estos análisis nos dan una idea tanto de la importancia como de la dificultad de comprimir el hidrógeno a altas presiones. Por lo que se manifiesta la imperante necesidad de desarrollar sistemas competitivos capaces de comprimir y almacenar el hidrógeno a las presiones necesarias con un rendimiento global considerablemente más elevado que los convencionales.

3 DISEÑOS COMERCIALES DE COMPRESORES DE HIDRÓGENO

*No basta con tener buen ingenio;
lo principal es aplicarlo bien*

- René Descartes -

Una vez comprendido el ciclo de compresión y las propiedades del hidrógeno que afectan a éste ciclo, se procede a narrar los dos tipos de diseños comerciales que existen actualmente en el mercado, siendo estos el compresor tipo booster y el compresor tipo diafragma metálico.

3.1. Compresor tipo booster

Este tipo de compresores se basan en el mismo principio de funcionamiento que los compresores alternativos convencionales en los cuales el movimiento vertical de un pistón produce el flujo y la compresión del gas de trabajo.



Figura 3-1 Compresor tipo booster

A continuación se muestra el diagrama P-V que apareció en el capítulo anterior, que ilustra las cuatro etapas de un proceso de compresión de un gas genérico en un compresor alternativo, las cuales coinciden con las de los compresores tipo booster.

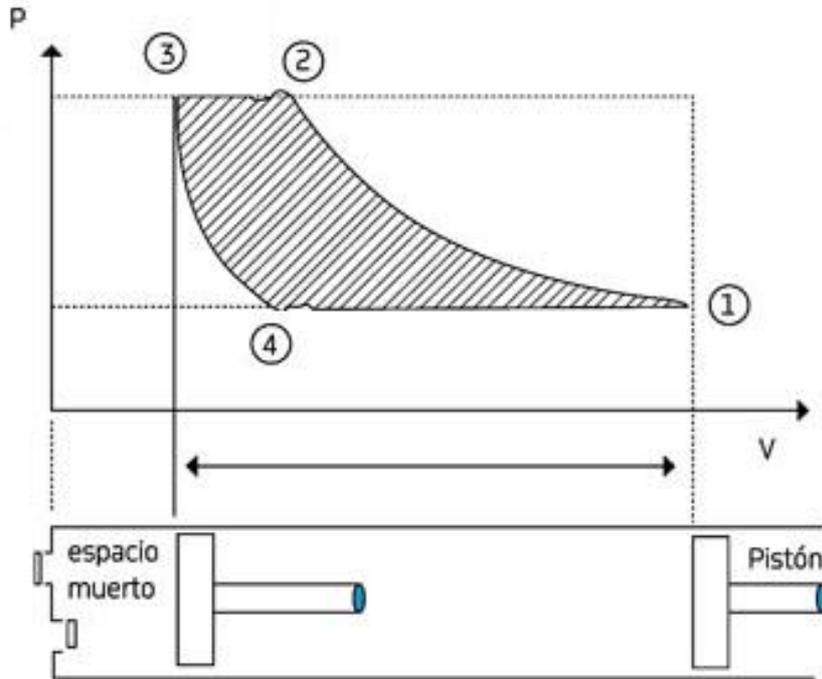


Figura 3-2 Diagrama P-V de compresión en un compresor tipo booster

Por tanto, los cálculos que se mostraron en el capítulo de “Análisis termodinámico” tendrán también validez para este tipo de compresores.

No obstante los compresores de hidrógeno guardan ciertas diferencias con los convencionales. En el siguiente párrafo se ilustra detalladamente su principio de funcionamiento.

3.1.1. Principio de funcionamiento

Como ya hemos apuntado antes, en los booster, el hidrógeno se comprime mediante la acción de un pistón alternativo al cual denominaremos pistón primario, el cual está conectado a un pistón secundario a través de un eje, este segundo pistón es a su vez impulsado por un fluido comprimido que será aire en el caso de los compresores neumáticos, o un aceite en el caso de los hidráulicos.

Este fluido impulsor procede de una estación de compresión independiente y capaz de alimentar a varios equipos simultáneamente.

El interés de este tipo de compresores radica en que adecuando la relación de tamaños entre ambos pistones, se puede conseguir multiplicar la relación de compresión del pistón primario sin necesidad de tener una presión tan elevada en el pistón secundario. De manera que el área del pistón primario sea menor que la del secundario.

Como la fuerza ejercida por el fluido impulsor se transmite a través del eje hacia el pistón primario, tendremos que el valor absoluto de las fuerzas coincide en ambos pistones, es decir:

$$F_1 = F_2$$

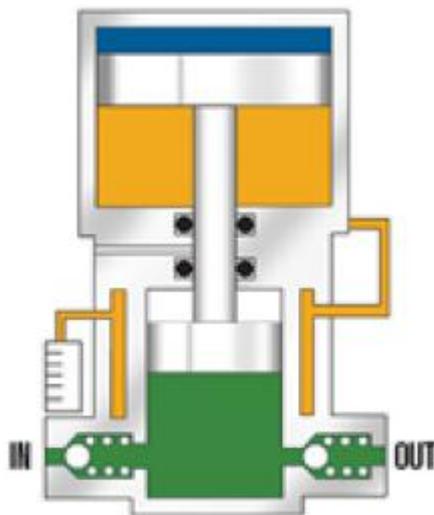
Si se expresan las fuerzas como el producto de la presión por el área de cada pistón, se tiene que:

$$P_1 * A_1 = P_2 * A_2$$

$$P_1 / P_2 = A_2 / A_1$$

Se observa que la relación entre las áreas de los émbolos y las presiones de las cámaras guardan una relación inversamente proporcional.

En la figura siguiente muestra un compresor tipo booster sencillo donde se puede observar su funcionamiento y la diferencia de tamaño de ambos émbolos.



Azul = Aire comprimido

Naranja = Aire de escape y refrigeración

Verde = Hidrógeno a comprimir

Figura 3-3 Esquema de un compresor tipo booster

3.1.2. Clasificación de los compresores tipo Booster

En esta sección se mostrarán los diferentes diseños de compresores de hidrógeno tipo booster que se puede encontrar hoy en día en el mercado. Y posteriormente se hará un análisis de los modelos que resulten más interesantes para repostaje de FCEVs.

En el mercado occidental, el fabricante Haskel es el que presenta más variedad de diseños en el campo de los compresores tipo booster y ofrece las soluciones más interesantes hoy en día, es por ello que los diseños que se muestran a continuación son todos extraídos de su catálogo.

Como ya se apuntó al principio de la sección, los compresores tipo booster se componen de dos pistones, uno primario, el cual es el encargado de comprimir el gas, y otro pistón secundario el cual es impulsado por otro fluido.

Normalmente el pistón primario tiene un área mayor que el secundario, con lo cual se consigue transmitir al hidrógeno una mayor presión de la que tiene el fluido impulsor.

A continuación presentamos los diferentes diseños que se encuentran en el catálogo del fabricante Haskel y las diferentes clasificaciones que se le pueden atribuir a estos compresores.

3.1.2.1. Según el fluido impulsor

Como ya apuntamos previamente los compresores pueden ser hidráulicos si el fluido impulsor es un aceite, o neumáticos si son movidos por aire.

Aunque ambos pueden alcanzar presiones similares, el compresor hidráulico será más apto si lo que necesitamos es mover un caudal de gas mayor como ya se verá en capítulos posteriores.

A continuación nos centraremos en las clasificaciones desde el enfoque de los distintos modos de compresión del hidrógeno según el diseño del compresor.

3.1.2.2. Según el número de etapas

Atendiendo a esta clasificación, los compresores se pueden dividir en monoetapas y bietapas.

Se entenderá por monoetapa aquel compresor en el cual cada ciclo completo recorrido por el pistón secundario actúe una sola vez sobre la corriente fluida, elevando su presión, como ilustra la siguiente figura.

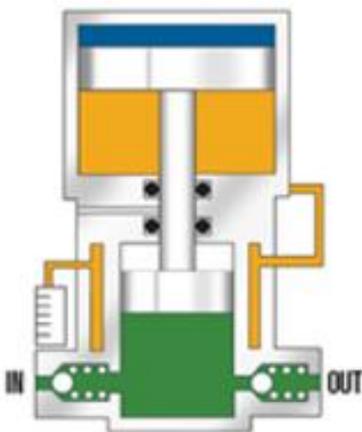


Figura 3-4 Esquema de compresor booster monoetapa

Análogamente, en los bietapas, cada ciclo completo del pistón secundario actuará dos veces en la corriente de hidrógeno, elevando su presión en dos etapas diferentes.

La ventaja de los compresores bietapas radica en la posibilidad de reducir las pérdidas térmicas al trabajar a altas presiones, introduciendo refrigeración entre ambas etapas. En el caso de los compresores tipo booster, se reducen también las pérdidas mecánicas al utilizar solamente un pistón secundario para las dos etapas.

En este caso, el hidrógeno puede atravesar las dos etapas de diferente manera: una de las maneras sería con un único pistón primario, aprovechando las dos carreras por ciclo de éste (Figura 3-5). O bien, a través de dos pistones primarios con distinta sección (Figura 3-6).

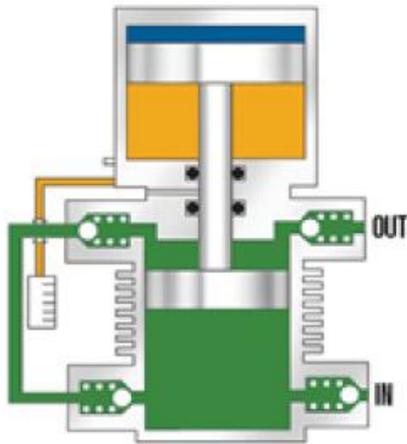


Figura 3-5 Compresor bietapa con un único pistón primario

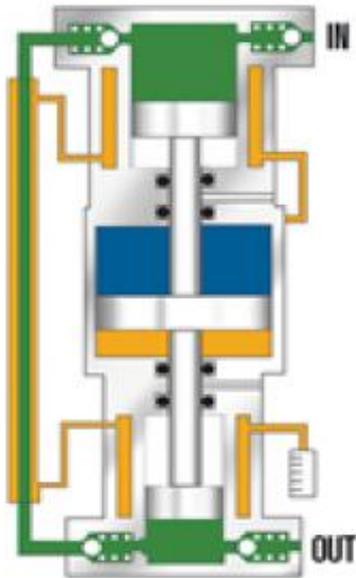


Figura 3-6 Compresor bietapa con dos pistones primarios

3.1.2.3. Según el número de efectos

Se entiende por efecto la cantidad de flujos que se impulsan por cada ciclo completo que recorre el émbolo secundario

De esta forma se pueden distinguir los compresores de simple efecto, capaces de mover un solo flujo, y los de doble efecto, capaces de mover dos flujos en paralelo y por tanto un caudal mayor.

El interés de mover dos flujos en paralelo radica en aprovechar una carrera de pistón para multiplicar el caudal de gas impulsado por cada ciclo.

De la misma manera que los bietapas, los compresores de doble efecto pueden actuar con uno o dos pistones, según muestran las figuras siguientes

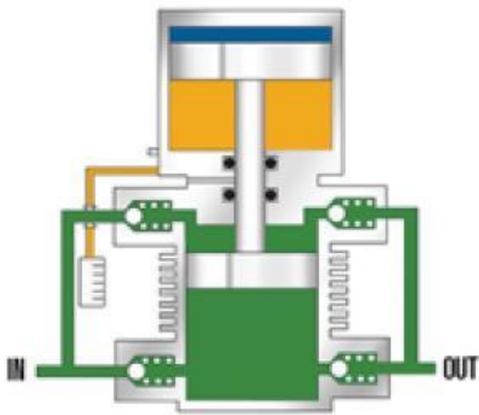


Figura 3-7 Compresor de doble efecto con un solo pistón primario

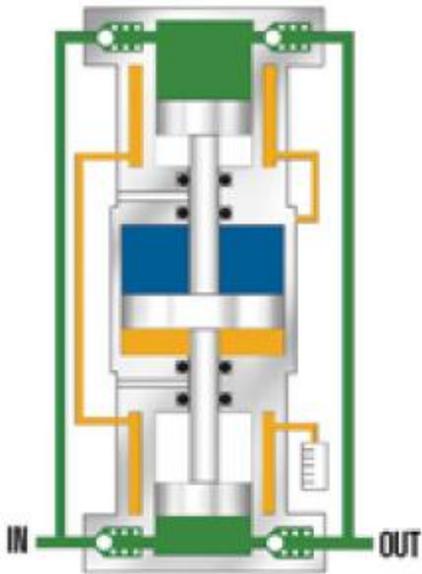


Figura 3-8 Compresor de doble efecto con dos pistones primarios

3.1.2.4. Integración de modelos

Además de existir una amplia variedad de diferentes diseños que ofrecen una gran versatilidad para todo tipo de aplicaciones, estos compresores son integrables como muestra la siguiente figura, por lo que su rango de operación se hace todavía más amplio.

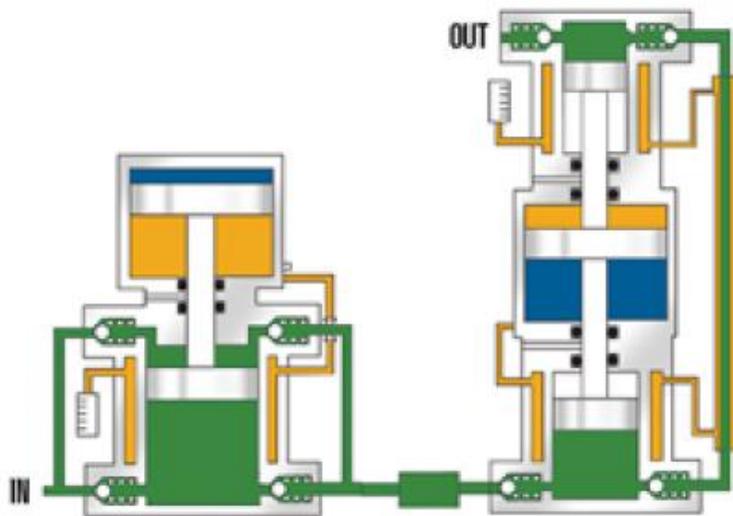


Figura 3-9 Compresor de doble efecto integrado con un compresor bietapa

3.2. Compresores tipo diafragma metálico

Este tipo de compresores, junto con los booster, son las soluciones más adecuadas hoy en día para comprimir hidrógeno a altas presiones. Ya que, como veremos posteriormente, son capaces de mover caudales importantes a presiones elevadas con un consumo razonable teniendo en cuenta la dificultad para comprimir el hidrógeno.

3.2.1. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de estos equipos, se basa en un pistón alternativo, que transmite su movimiento a un diafragma flexible, compuesto por tres membranas de diferentes metales, a través de un aceite hidráulico. Debido a la fuerza ejercida por el aceite sobre el diafragma, este se dobla y oscila, aumentando y disminuyendo el volumen de la cámara de compresión y, variando consecuentemente, la presión del gas de trabajo.

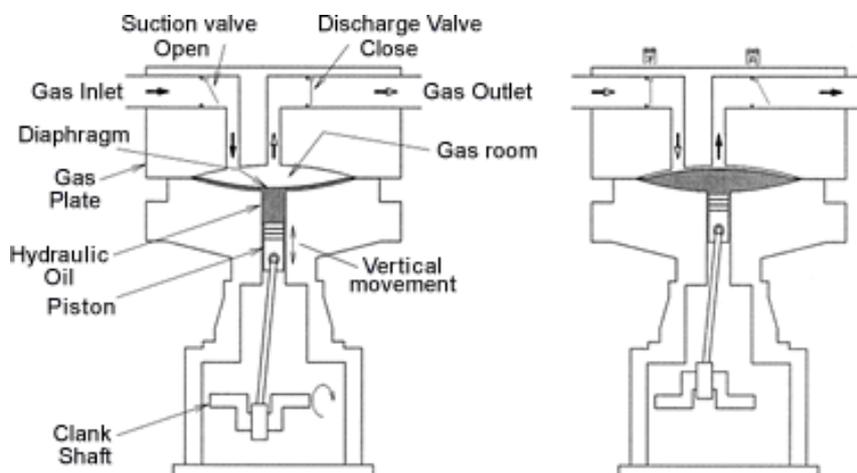


Figura 3-10 Esquema de funcionamiento de un compresor tipo diafragma

La principal ventaja que diferencia a este tipo de máquinas es que gracias a la triple membrana, el hidrógeno no entra en contacto con el aceite de lubricación ni con el hidráulico, de esta manera se obtiene el gas comprimido con una pureza muy elevada.

Otro aspecto de gran importancia en el tema que nos ocupa, es la capacidad de éste tipo de máquinas de alcanzar presiones muy elevadas, incluso por encima incluso de los 4000 bar.

Si bien la variedad de diseños de este tipo de compresores no es tan amplia como en el caso de los booster, no es difícil encontrar catálogos que oferten compresores tipo diafragma metálico que se ajusten a los parámetros de presión y caudal requeridos en el ámbito de las hidrogeneras.

Cabe destacar, dentro del mercado de compresores de hidrógeno de este tipo, al fabricante PDC Machines cuyo catálogo de compresores de diafragma analizaremos en secciones siguientes.

Se muestra a continuación un compresor de diafragma del fabricante PDC Machines orientado a repostaje de FCEV instalado con sus equipos auxiliares. Un sistema similar, se encuentra instalado en una hidrogenera piloto en Korea.

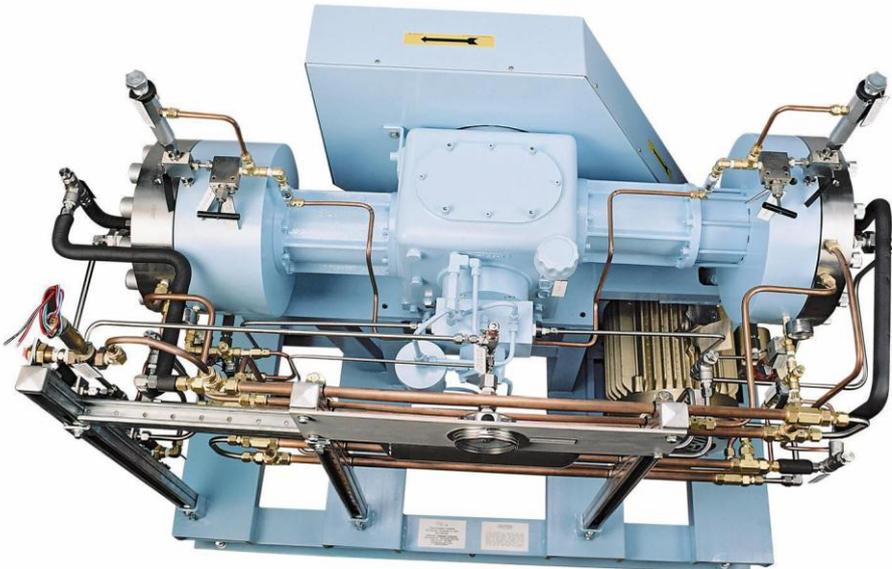


Figura 3-11 Compresor tipo diafragma instalado con equipos auxiliares

4 ESTUDIO DE CATÁLOGOS

Estudia, no para saber una cosa más, sino para saberla mejor.

- Séneca -

Como ya se mostró en el capítulo anterior existe en el mercado una amplia variedad de diseños de compresores volumétricos para hidrógeno, por ello, se hace necesario seguir unas directrices para la mejor comprensión e interpretación de los parámetros presentados en los diferentes catálogos, con el fin de seleccionar el equipo que mejor se adapte a la aplicación requerida.

4.1. Método de selección

En este caso se realizará el análisis de los catálogos de los principales fabricantes, siendo estos, Haskel, PDC Machines, HydroPac, KajiTech y Toyokoatsu. Estos últimos destacan sobre todo en el mercado japonés, el cual se ha tenido en cuenta debido a que Japón es actualmente uno de los países del mundo que más está apostando por el desarrollo de la tecnología del hidrógeno.

El análisis estará enfocado a la instalación de los compresores en una hidrogenera para el abastecimiento de vehículos con una presión de almacenamiento igual a 700 bar y capaces de almacenar 6 kg de hidrógeno ($67,2 \text{ Nm}^3$) tal y como se calculó en el capítulo de “Análisis Termodinámico”, con el objetivo de que estos FCEVs tengan una autonomía similar a los vehículos existentes en el mercado actual.

En primer lugar, se descartarán los modelos que no sean capaces de alcanzar los 700 bar de presión.

A continuación, teniendo en cuenta el parámetro del caudal, se calculará el tiempo que tardan los modelos preseleccionados en rellenar un depósito de 6 kg de hidrógeno ($67,2 \text{ Nm}^3$) y se seleccionarán aquellos que ofrezcan un tiempo de repostaje más bajo.

Se destacarán los equipos capaces de suministrar un flujo superior a $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$, o su equivalente en el sistema anglosajón, 500 SCFM (Pie cúbico estándar por minuto), ya que con caudales volumétricos superiores a éste, se podrá rellenar completamente un depósito típico de hidrógeno en menos de 5 minutos.

A continuación se hallará el consumo específico, el cual se definirá como la cantidad de energía necesaria para mover 1 Nm^3 de hidrógeno.

Este consumo se calculará a través de la siguiente fórmula:

$$Ee \left(\frac{kJ}{Nm^3} \right) = \frac{Pa(kW) * 3600s}{Q \left(\frac{Nm^3}{h} \right)}$$

Siendo Ee los kilojulios empleados en impulsar 1 Nm³; Pa la potencia absorbida por el compresor y Q el caudal de gas movido en condiciones normales.

A partir del consumo específico, se puede calcular el trabajo que emplearía un compresor en llenar un depósito completo simplemente conociendo el volumen de dicho depósito, sin embargo, para la comparativa de equipos, nos basta con saber que a menor consumo específico, menor será el trabajo empleado en rellenar completamente un depósito

En consecuencia, el parámetro de la potencia del motor del compresor resulta ahora poco importante, ya que el consumo final dependerá tanto de la potencia como del caudal movido. De manera que un compresor de poca potencia podrá tener un consumo final mayor que otro de potencia y caudal más elevado.

Teniendo en cuenta estos parámetros, se realizará una preselección de los compresores con las características más adecuadas de cada catálogo por separado.

Finalmente, se hará una comparativa de los compresores seleccionados haciendo un estudio más profundo en los equipos seleccionados, en el caso de que la información disponible lo permitiese.

4.2. Comparativa de catálogos

Una vez se han fijado unas pautas generales para la selección de modelos y se han fijado los parámetros más importantes que se requieren en una instalación de repostaje de hidrógeno se puede pasar a comparar los catálogos de los diferentes fabricantes nombrados al principio de la sección anterior.

4.2.1. Haskel

Este fabricante destaca en el ámbito de los compresores tipo booster, dividiéndose estos en dos tipos, neumáticos (impulsados por aire) e hidráulicos (impulsados por aceite). Los compresores neumáticos se encuentran divididos a su vez en dos series: la serie 5,15" y la serie 8".

Haskel dispone también de una oferta de compresores de hidrógeno tipo membrana, no obstante, todos suministran una presión inferior a 700 bar y caudales muy reducidos, por lo que no se tendrán en cuenta en este análisis

Seguidamente se analizarán los modelos disponibles de compresores tipo booster, comenzando en primer lugar por los neumáticos de la serie 5,75".

4.2.1.1 Compresores neumáticos

5.75" Air Drive Models

Base Booster Model No.	Hydrogen Model	Hydrogen Maximum		Supply Pressure	Flow SCFM @ psi*	Hydrogen System Model No.
		PSI	BAR			
AG-30	87083	4500	310	800	3.04 @ 2800	
AG-62	86979	9000	620	1000	4.21 @ 4800	86979
AG-75	86980	11250	775	1500	3.81 @ 6000	86980
AG-152	86981	15000	1034	2000	3.02 @ 12000	86981
AGD-7	86982	2500	172	150	6.85 @ 710	86982
AGD-15	86983	4000	276	500	10.68 @ 1700	86983
AGD-30	86984	9000	620	750	8.12 @ 3150	86984
AGD-32	86985	4000	276	750	10.75 @ 3150	86985
AGD-62	86986	9000	620	1000	6.97 @ 5800	86986
AGD-75	86987	15000	1034	1500	6.18 @ 7500	86987
AGD-152	86988	15000	1034	2000	5.07 @ 14000	86988
AGT-7/15	86989	2500/4000	172/276	100	2.63 @ 1410	86989
AGT-7/30	86990	2500/9000	172/620	100	2.30 @ 2820	86990
AGT-14/62	83007	2500/9000	172/620	250	5.8 @ 4000	86991
AGT-15/30	86992	4000/9000	276/620	500	5.88 @ 3400	86992
AGT-15/75	86993	4000/12000	276/827	250	2.34 @ 7250	86993
AGT-30/75	86994	9000/12000	620/827	500	2.70 @ 7250	86994
AGT-32/62	86995	4000/9000	276/620	1000	8.08 @ 6800	86995
AGT-32/152		4000/15000	276/1034	350	1.93 @ 13750	86996
AGT-62/152		9000/15000	620/1034	1000	3.80 @ 14500	86997

Figura 4-1 Catálogo Haskel. Compresores neumáticos serie 5.75"

Existen varios equipos en la serie 5.75" capaces de alcanzar muy altas presiones, llegando incluso a los 1034 bar, no obstante los flujos nominales de este tipo de compresores son excesivamente reducidos si lo que buscamos es rellenar el depósito de un vehículo en poco tiempo.

A pesar de no ser útiles para alimentar un vehículo de hidrógeno, estos compresores podrían ser interesantes para almacenar el hidrógeno en aplicaciones estacionarias o para distribución de botellas a presión, donde el tiempo de llenado no sea un factor tan limitante como en el sector de la automoción.

A continuación se analizará la serie 8" de compresores neumáticos.

8" Air Drive Models

Base Booster Model No.	Hydrogen Model	Hydrogen Maximum		Supply Pressure	Flow SCFM @ psi*	Hydrogen System Model No.
		PSI	BAR			
8AGD-2	59060	300	20	25	26.14 @ 250	
8AGD-14	59060	5000	345	150	9.20 @ 980	87219
8AGD-30	87218	5000	345	750	14.26 @ 3150	87201
8AGD-60	87201	5000	620	1000	9.47 @ 5800	87185
8AGT-14/30	87185	5000	345	500	10.73 @ 3400	87226
8AGT-14/60		9000	620	250	3.87 @ 6000	87225
8AGT-30/60		9000	620	1000	10.4 @ 6800	87224

Figura 4-2 Catálogo Haskel. Compresores neumáticos serie 8"

En esta serie no existe ningún equipo que alcance presiones de trabajo superiores a 700 bar por lo que ninguno sería adecuado para alimentar el dispensador de una hidrogenera, además, al igual que ocurría en la serie 5.75", estos compresores tampoco pueden suministrar un caudal suficiente para rellenar un depósito en un tiempo razonable.

Se pasará entonces a analizar los modelos hidráulicos sin preseleccionar ningún modelo tipo neumático.

4.2.1.2. Compresores hidráulicos

La principal característica de este tipo de compresores que los hacen más interesantes que los neumáticos es sin duda el caudal nominal de éstos, siendo incluso órdenes de magnitud superior que en el caso de los compresores impulsados por aire.

A continuación se preseleccionarán varios modelos según su presión y caudal, y se calculará el tiempo de repostaje tal y como se indicó en la primera sección del capítulo.

Catalog No.	Hydrogen Number	Supply Pressure Min. PSIG	Supply Pressure Max. PSIG	Outlet Pressure Max. PSIG	Maximum Compression Ratio	Displacement /Cycle cu. in.	Cycles Per Minute	SAMPLE PERFORMANCE Hydraulic Pressure ; 2500 PSI				
								HP Input	Ps	Po	CPM	Q
100HGD6-145	100HGD6-145-EX-103 100HGD6-145-NP-103	50	1850	1850	6	311.6	25	22.4	150	900	25	39.0
								27.0	250	1200	25	64.5
								28.2	500	1500	25	131.2
								27.2	1050	2000	25	279.5
100HGD6-115	100HGD6-115-EX-103 100HGD6-115-NP-103	50	2750	2750	6	190.9	25	22.0	200	1400	25	30.5
								26.6	275	1800	25	41.7
								27.3	725	2300	25	115.1
								27.7	1200	2800	25	192.8
100HGD6-85	100HGD6-85-EX-103 100HGD6-85-NP-103	100	6000	6500	6	107.4	25	16.9	500	2000	25	44.1
								27.4	690	3500	25	59.0
								28.5	1800	4750	25	158.9
								27.2	3200	6000	25	272.4
100HGD6-50	100HGD6-50-EX-103 100HGD6-50-NP-103	100	9000	13500	6	40.1	25	19.3	1200	6000	25	37.4
								24.0	1600	8000	25	49.4
								27.2	2500	10000	25	78.3
								27.2	4500	12000	25	129.4
120HGD10-165	120HGD10-165-EX-102 120HGD10-165-NP-102	50	1850	1850	6	715.7	18	25.1	75	550	18	36.0
								43.4	175	1100	18	77.7
								44.4	250	1200	18	110.8
								42.4	300	1200	18	133.2
120HGD10-85	120HGD10-85-EX-102 120HGD10-85-NP-102	100	6000	6500	6	178.9	18	24.2	800	2500	18	87.6
								27.0	1200	3200	18	131.4
								40.4	1300	4600	18	129.2
								39.5	2500	5800	18	264.7
120HGD10-50	120HGD10-50-EX-102 120HGD10-50-NP-102	100	9000	13500	6	67.8	18	29.6	1400	7000	18	55.3
								35.4	1800	9000	18	70.5
								41.2	2200	11000	18	85.4
								48.0	2800	13500	18	106.9
100HGT6-145/85	100HGT6-145/85-EX-103 100HGT6-145/85-NP-103	50	1850	6500	104	156	25	16.8	250	2200	25	33.6
								20.4	300	2800	25	40.0
								23.7	400	3500	25	52.8
								27.3	400	4000	25	65.7
100HGT6-145/50	100HGT6-145/50-EX-103 100HGT6-145/50-NP-103	50	1850	6500	280	156	25	27.1	150	3200	25	18.9
								28.0	150	3800	25	18.9
								28.4	150	4950	25	18.8
								28.6	150	5500	25	18.8
100HGT6-115/85	100HGT6-115/85-EX-103 100HGT6-115/85-NP-103	50	2750	6500	64	95	25	19.0	250	2200	25	21.1
								23.1	300	2800	25	25.1
								25.7	400	3500	25	33.2
								29.8	500	4000	25	41.3
100HGT6-115/50	100HGT6-115/50-EX-103 100HGT6-115/50-NP-103	50	2750	13500	171	95	25	14.6	175	3500	25	14.1
								14.7	175	4000	25	14.1
								17.4	175	5000	25	14.0
								20.8	250	6000	25	11.5
100HGT6-85/50	100HGT6-85/50-EX-103 100HGT6-85/50-NP-103	100	6000	13500	96	53	25	17.5	300	5000	25	13.8
								22.6	400	7000	25	31.0
								24.8	500	8000	25	22.6
								28.7	750	10000	25	33.7
120HGT10-165/85	120HGT10-165/85-EX-102 120HGT10-165/85-NP-102	50	1850	6500	144	358	18	28.8	175	2800	18	39.8
								33.8	200	3500	18	45.2
								43.4	200	4500	18	45.1
								46.3	250	5000	18	55.8
120HGT10-165/50	120HGT10-165/50-EX-102 120HGT10-165/50-NP-102	50	1850	13500	386	90	18	47.2	100	4000	18	22.2
								47.1	100	5000	18	22.1
								51.8	110	7000	18	24.1
								52.2	110	8000	18	24.6
120HGT10-85/50	120HGT10-85/50-EX-102 120HGT10-85/50-NP-102	100	6000	13500	96	34	18	31.4	300	7000	18	16.9
								32.4	600	8000	18	33.2
								38.3	700	10000	18	38.6
								48.4	900	13500	18	49.4

Figura 4-3 Catálogo Haskel. Compresores hidráulicos

Se tendrán en cuenta exclusivamente los modelos que suministran 13500 psig por ser los únicos que superan los 700 bar. De esta manera, se han preseleccionado los siguientes modelos:

- 100HGD6-50
- 120HGD10-85
- 100HGT6-115/50
- 100HGT6-85/50
- 120HGT10-165/50
- 120HGT10-85/50

De estos modelos, se descartarán aquellos que suministren un caudal volumétrico por debajo de los 160Nm³/h (100SCFM). En consecuencia, se analizarán solamente los modelos que se muestran en la siguiente tabla.

Catalog No.	Hydrogen Number	Supply Pressure Min. PSIG	Supply Pressure Max. PSIG	Outlet Pressure Max. PSIG	Maximum Compression Ratio	Displacement /Cycle cu. in.	Cycles Per Minute	SAMPLE PERFORMANCE Hydraulic Pressure ; 2500 PSI				
								HP Input	Ps	Po	CPM	Q
100HGD6-50	100HGD6-50-EX-103 100HGD6-50-NP-103	100	9000	13500	6	40.1	25	19.3	1200	6000	25	37.4
								24.0	1600	8000	25	49.4
								27.2	2500	10000	25	78.3
								27.2	4500	12000	25	129.4
120HGD10-50	120HGD10-50-EX-102 120HGD10-50-NP-102	100	9000	13500	6	67.8	18	29.6	1400	7000	18	55.3
								35.4	1800	9000	18	70.5
								41.2	2200	11000	18	85.4
								48.0	2800	13500	18	106.9

Figura 4-4 Catálogo Haskel. Compresores hidráulicos de elevado caudal

Se estudiarán ahora los tiempos de llenado de cada modelo. Se muestra de nuevo la ecuación a utilizar.

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{Q(SCFM) * 1.61[(Nm^3/h)/SCFM]}$$

Siendo 67.2 Nm³ el volumen de un depósito de 6 kg de hidrógeno, y Q el caudal máximo en SCFM suministrado por el equipo.

- Modelo 100HGD6-50

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{129.4(SCFM) * 1.61[(Nm^3/h)/SCFM]} = 19,4 min$$

- Modelo 100 HGD10-50

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{106.9(SCFM) * 1.61[(Nm^3/h)/SCFM]} = 23,5 min$$

Aunque estos tiempos de espera no difieren demasiado, si observamos el consumo de ambos equipos cuando operan dando el máximo caudal se observa que este si es notablemente menor en el modelo 100HGD6-50

Mientras que el primer modelo consume unos 20.3 kW, el modelo 120HGD10-50 absorbería 35.81 kW, por lo que utilizando el modelo 100HGD6-50 se conseguiría un ahorro del 43.3%, además de conseguir un tiempo de repostaje 4 minutos más rápido. Si bien es cierto que este ahorro es en parte consecuencia de que este modelo trabaja en el régimen estudiado a una presión inferior, no obstante, este factor no supone problema alguno ya que la presión de trabajo sería de 827 bar, muy superior a los 700 bar requeridos por el depósito.

En consecuencia a todo lo expuesto, del catálogo Haskel, seleccionamos para nuestra aplicación únicamente el compresor hidráulico modelo 100HGD6-50.

Resulta también interesante estudiar el consumo específico del compresor, es decir, la energía empleada en impulsar cada Nm^3 de hidrógeno.

Calculándose esta energía con la siguiente ecuación:

$$Ee \left(\frac{kJ}{Nm^3} \right) = \frac{Pa(kW) * 3600s}{Q \left(\frac{Nm^3}{h} \right)}$$

Tomando estos datos del catálogo tenemos que:

$$Pa = 20,3 kW$$

$$Q = 207.69 \frac{Nm^3}{h}$$

$$Ee = \frac{20,3 kW * 3600s}{207.69 Nm^3/h} = 352 (kJ/Nm^3)$$

Este dato será útil para comparar posteriormente compresores de diferentes tipos y fabricantes.

4.2.2 PDC Machines

Este fabricante oferta exclusivamente compresores tipo diafragma, como el mostrado en la imagen de abajo y, aunque su catálogo es bastante más reducido que el de otros fabricantes, está más enfocado al repostaje de FCEV y por tanto sus modelos son capaces de mover gran cantidad de flujo a altas presiones.

No obstante un importante inconveniente de su catálogo es la reducida información que ofrecen de cada modelo, y por tanto el análisis se encontrará más limitado.



Figura 4-5 Compresor tipo diafragma. PDC Machines

A continuación se muestra una tabla que recoge todos los modelos de compresores de hidrógeno que oferta el fabricante PDC Machines

Model Series	Suction Pressure PSIG[BARG]	Outlet Pressure PSIG[BARG] General Industry	Outlet Pressure PSIG[BARG] Cylinder Filling	Outlet Pressure PSIG[BARG] Hydrogen Energy	Capacity Max SCFM[Nm ³ /hr]	Horsepower (kW)
PDC-1	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	<1 [1.6]	<1 [.75]
PDC-3	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	Up to 16[20]	15 [10]
PDC-4	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	Up to 100 [160]	30 [22]
PDC-4(150)	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	Up to 150 [241]	40 [30]
PDC-5	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	Up to 350 [563]	75 [55]
PDC-13(100)	Varies	Varies	2900-6500 [200-484]	14504 [1000]	Up to 1865 [3000]	220 [175]

Figura 4-6 Catálogo PDC Machines

Se observa que, para compresión de hidrógeno, todos los compresores alcanzan los 1000 barg, con lo cual, en este catálogo los únicos parámetros discriminantes serán los consumos y tiempos de llenado a partir de datos del caudal.

Se procede ahora a calcular los tiempos de llenado de los modelos con un caudal superior a los 100 Nm³/h, con el objetivo de estudiar compresores con desempeños similares a los de la subsección anterior.

– Modelo PDC-4

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{160 (Nm^3/h)} = 25,2 min$$

– Modelo PDC-4(150)

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{241 (Nm^3/h)} = 16,7 min$$

– Modelo PDC-5

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{563 (Nm^3/h)} = 7,16 min$$

– Modelo PDC-13(100)

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{1865 (Nm^3/h)} = 2,16 min$$

En este tipo de compresores destacan los reducidos tiempos de llenado que se consiguen en comparación con los que se observan en los compresores tipo booster.

A continuación compararemos los consumos específicos de los modelos preseleccionados:

- Modelo PDC-4

$$Ee = \frac{22 \text{ kW} * 3600s}{160 \text{ (Nm}^3\text{/h)}} = 495 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}$$

- Modelo PDC-4(150)

$$Ee = \frac{30 \text{ kW} * 3600s}{241 \text{ (Nm}^3\text{/h)}} = 448 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}$$

- Modelo PDC-5

$$Ee = \frac{55 \text{ kW} * 3600s}{563 \text{ (Nm}^3\text{/h)}} = 352 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}$$

- Modelo PDC-13(1000)

$$Ee = \frac{175 \text{ kW} * 3600s}{1865 \text{ (Nm}^3\text{/h)}} = 338 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}$$

Se observa un descenso muy notable del consumo específico a medida que aumentan los flujos. Lo cual hace destacar sobre el resto al modelo PDC-13(100), ya que este no solo tendrá un tiempo de llenado mucho menor, sino que tendrá un menor consumo final.

4.2.3. Kajitech

Este fabricante no publica ningún catálogo, si no que muestra sus modelos directamente en su página web.

Para compresión de hidrógeno, solo dispone de cuatro modelos diferentes, dentro de los cuales estudiaremos los dos únicos que alcanzan una presión superior a 700 bar, los cuales se muestran a continuación:

- Modelo VT5-110GH-OL (HyKom400)

Se trata de un modelo de compresor alternativo tipo booster de cinco etapas y diseñado específicamente para tratar hidrógeno. A continuación se puede ver tanto una fotografía de un

compresor real con todos los equipos auxiliares instalados y un esquema en perspectiva de sus partes.



Figura 4-7 Compresor KajiTech modelo HyKom400

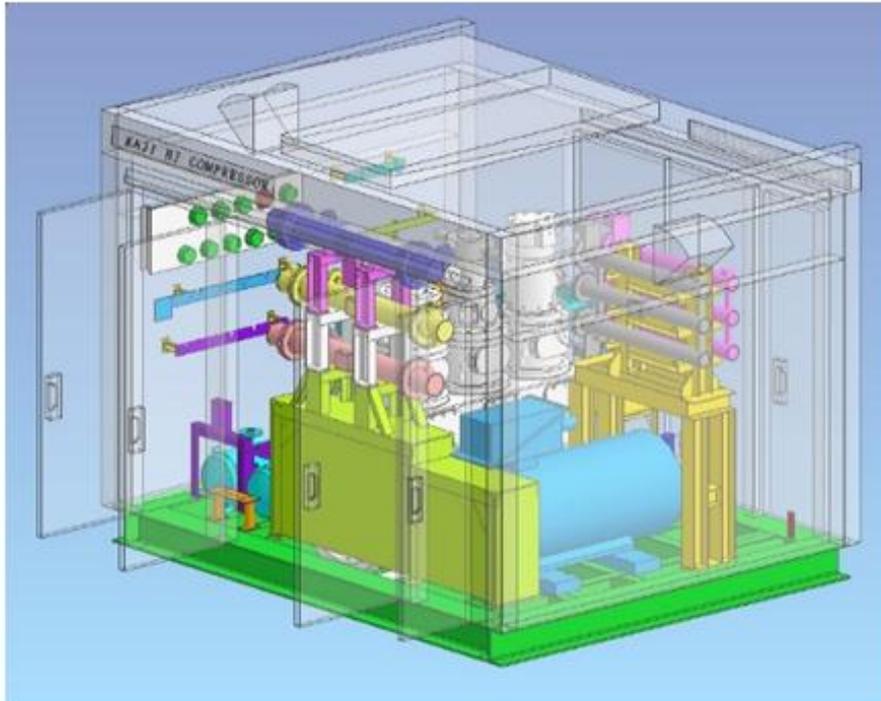


Figura 4-8 Esquema del compresor de KajiTech modelo HyKom400

Este modelo destaca dentro del campo de los compresores tipo booster por la gran cantidad de caudal que es capaz de mover, como se puede observar en la tabla de especificaciones siguiente:

Ejemplo Modelo	VT5-110GH-OL
Modelos	Vertical de compresión de cinco etapas refrigerado por agua libre de aceite
Manipulación de gas	Hidrógeno
La presión de succión	0.6MPa
La presión de descarga	82MPa
Caudal de descarga	340Nm ³ / hr
Potencia nominal	110kW

Figura 4-9 Tabla de especificaciones modelo HyKom400 (KajiTech)

Siguiendo con las directrices de análisis de catálogo, se procederá a calcular el tiempo de llenado de un depósito de un vehículo hidrógeno.

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{340(Nm^3/h)} = 11,85 \text{ min}$$

El tiempo de llenado de este modelo, a pesar de ser de los más grandes en cuanto a compresor tipo booster se refiere, es de lejos mayor que el de los compresores tipo diafragma metálico.

Por último, se calculará el consumo específico de la misma manera que se hizo en los casos previos.

$$Ee = \frac{110 \text{ kW} * 3600s}{340 (Nm^3/h)} = 1164,7 (kJ/Nm^3)$$

– Modelo XQ4A-60GH-OL + WSA-60GH-OL

Este modelo está compuesto en realidad por dos compresores integrados para alcanzar una presión más alta de la que obtienen por separado (Hasta 1100bar) con relaciones de compresión muy elevadas. En las imágenes siguientes se muestran una fotografía del equipo completo así como la tabla donde el fabricante recoge la información publicada del equipo.



Figura 4-10 Compresor KajiTech modelo integrado

Ejemplo Modelo	XQ4A-60GH-OL + Tipo WSA-60GH-OL
Modelos	XQ4A-60GH-OL: en forma de X de cuatro cilindros de 4 etapas de compresión refrigerado por aire sin aceite WSA-60GH-OL: en forma de W un cilindro de compresión de 1 etapa refrigerado por aire sin aceite
Manipulación de gas	Hidrógeno
La presión de succión	0.6MPa
La presión de descarga	110MPa
Caudal de descarga	200m ³ / hr
Potencia nominal	60kW + 20 kW

Figura 4-11 Tabla de especificaciones KajiTech modelo integrado

Para la posterior comparativa, se hallarán los parámetros de tiempo de llenado y consumo específico que se vienen calculando para todos los modelos estudiados.

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{200 \left(\frac{Nm^3}{h}\right)} = 20,16 \text{ min}$$

$$Ee = \frac{80 \text{ kW} * 3600s}{200 (Nm^3/h)} = 1440 (kJ/Nm^3)$$

A pesar de ofrecer una presión más elevada, este último modelo ofrece un tiempo de llenado y un consumo específico mayor que el modelo Hykom400, por tanto, en la comparativa posterior no se tendrá en cuenta éste último modelo de Kajitech, solamente el equipo Hykom400.

4.2.4. Toyokoatsu

Este fabricante al igual que su paisano, Kajitech, oferta exclusivamente compresores tipo booster, y, aunque su oferta es algo más extensa, sus características son de órdenes de magnitud similares como se muestra a continuación.

Modelo de compresor	Número de cabezas (etapa)	Presión de descarga más alta (MPa)	Caudal de descarga máxima a 400 rpm (MB / AR)	Capacidad del motor (referencia) (kW)
Mil	Uno	68.95MPa	8m ³ / hr	2,2 kW
2000	Uno	103.5MPa	14m ³ / hr	5,5 kW
2L	Dos	103.5MPa	14m ³ / hr	5,5 kW
4000	Uno	103.5MPa	85m ³ / hr	7,5 kW
4L	Dos	103.5MPa	85m ³ / hr	7,5 kW
5000	Uno	206.8MPa	52m ³ / hr	22kW
5L	Dos	103.5MPa	52m ³ / hr	30kW
7000	Uno	206.8MPa	166m ³ / hr	37kW
7V	Dos	51.7MPa	166m ³ / hr	37kW
9000	Uno	103.5MPa	187m ³ / hr	55kW
9X000	Uno	103.5MPa	187m ³ / hr	75kW
9H	Dos	68.95MPa	680m ³ / hr	160kW

Figura 4-12 Oferta de compresores Toyokoatsu

Como se viene haciendo, se calculará en primer lugar el tiempo de llenado de un depósito de FCEV y posteriormente su consumo específico de los modelos 9H y 9000.

Por ser los dos que ofrecen un caudal más elevado y teniendo el modelo 9000 un consumo más pequeño que el 9X000 incluso trabajando a la misma presión y con el mismo caudal.

– Modelo 9H

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{680 \left(\frac{Nm^3}{h}\right)} = 5,93 \text{ min}$$

$$Ee = \frac{160 \text{ kW} * 3600s}{680 (Nm^3/h)} = 547 (kJ/Nm^3)$$

Hay que tener en cuenta que este modelo solamente alcanza los 689,5 bar, por lo que solo sería apto para depósitos con una presión de almacenamiento inferior a esta. A pesar de que el dimensionado del depósito se ha hecho para 700 bar, por simplicidad se tomará este compresor por válido provisionalmente.

– Modelo 9000

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{187 (Nm^3/h)} = 21,56 \text{ min}$$

$$Ee = \frac{55 \text{ kW} * 3600s}{187 (Nm^3/h)} = 1059 (kJ/Nm^3)$$

Se observa que los parámetros analizados del modelo 9000 son menos interesantes para nuestra aplicación que en otros modelos analizados, por tanto no se tendrá en cuenta en la comparativa de la siguiente sección.

4.2.5 HydroPac

El fabricante HydroPac oferta un solo modelo de compresor de hidrógeno a alta presión. El cual estudiaremos en esta subsección y compararemos en la sección siguiente con el resto de modelos.

El modelo al cual nos hemos referido es el C12-40-7000LX, es un modelo tipo booster de dos etapas y presenta las siguientes especificaciones:

- Presión de salida: 800 bar
- Flujo: 562 Nm³/h
- Potencia: 30 kW



Figura 4-13 Compresor modelo C12-40-7000LX (Hydropac)

A continuación se estudian los parámetros de tiempo de llenado y consumo específico para la comparación de modelos en la sección siguiente.

$$t = 67.2(Nm^3) * \frac{60(min/h)}{562 \left(\frac{Nm^3}{h}\right)} = 7,17 \text{ min}$$

$$Ee = \frac{30 \text{ kW} * 3600s}{562 (Nm^3/h)} = 192,17(kJ/Nm^3)$$

4.3. Comparativa de modelos preseleccionados

Ahora que conocemos con más detalle el mercado actual de compresores de hidrógeno a alta presión, es posible analizarlos conjuntamente comparando los parámetros estudiados y de esta manera hacer más sencilla la selección de modelos para cada aplicación.

Los parámetros a los cuales se les dará más importancia serán el tiempo de llenado de depósito y el consumo específico. Aunque también se tendrá en cuenta la presión, esta no será determinante para la selección ya que este parámetro viene limitado por el depósito de almacenamiento.

Fabricante	Haskel	PDC Machines	Kajitech	Toyokoatsu	Hydropac
Modelo	100HGD6-50	PDC-13(100)	VT5-110GH-OL	9H	C12-40-7000LX
Tipo	Booster	Diafragma	Booster	Booster	Booster
Presión de salida	827	1000	820	689,5	800
Relación de compresión	6	N/D	N/D	N/D	N/D
Tiempo de llenado (min)	19,4	2,16	11,85	5,93	7,17
Consumo específico (kJ/Nm³)	352	338	1164,7	547	192,17

Figura 4-14 Tabla resumen de características de los modelos preseleccionados

Lo primero que llama la atención es que en solamente un modelo se encuentra especificada su relación de compresión, parámetro fundamental a la hora de establecer comparaciones en cuanto a consumo. Por ello realizaremos una comparativa teniendo en cuenta principalmente el tiempo de llenado y como factor secundario el consumo específico, al depender éste directamente de la relación de compresión.

En primer lugar, se descartarán los modelos de Haskel y Kajitech, ya que sus caudales de trabajo son muy inferiores a los otros dos modelos mostrados en la tabla, por tanto, resultarían menos adecuados para repostar un FCEV en comparación con el resto de equipos ya que en estos se buscan tiempos de repostaje reducidos. Por ello continuaremos el estudio solamente con los modelos de PDC Machines, Toyokoatsu e HydroPac

Utilizando el dato de consumo específico hemos calculado en los modelos de PDC Machines, Toyokoatsu podemos estimar los gastos que supondría rellenar un depósito de hidrógeno en términos de energía total, comparándolo con el PCI del hidrógeno comprimido, y en términos de costes monetarios, en euros, según el precio medio del kWh en España.

4.3.1. Gastos en términos de energía

Conociendo el volumen normalizado del depósito a rellenar y el consumo específico, resulta trivial el cálculo total de energía, obteniéndose éste según la formula siguiente:

$$Et (kJ) = Ee \left(\frac{kJ}{Nm^3} \right) * Vd(Nm^3)$$

Siendo V_d el volumen normalizado del depósito a rellenar, el cual se supondrá igual al que veníamos tomando hasta ahora, es decir, $V_d=67,2\text{Nm}^3$.

Una vez conocido este dato podemos compararlo con el PCI del hidrógeno comprimido, y expresar el resultado como % del PCI. Calculándose el PCI total del hidrógeno en un depósito de $67,2\text{ Nm}^3$ (PCI_d):

$$PCI_d = 10,79\text{MJ}/\text{Nm}^3 * 67,2\text{ Nm}^3 = 724,95\text{ MJ}$$

Se procede a calcular los consumos de los dos modelos citados previamente

– Modelo PDC Machines

Consumo específico: $E_e = 338\text{ kJ}/\text{Nm}^3$

$$E_t = 338\text{kJ}/\text{Nm}^3 * 67,2\text{Nm}^3 = 22713,6\text{ kJ}$$

Comparando el consumo final de éste modelo con la energía que aportaría el hidrógeno del depósito se tiene que:

$$\frac{E_t}{PCI_d} = \frac{22713,6}{724950} * 100 = 3,1$$

– Modelo Toyokoatsu

Consumo específico $E_e = 547\text{ kJ}/\text{Nm}^3$

$$E_t = 547 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} * 67,2\text{Nm}^3 = 36758,4\text{ kJ}$$

Comparando el consumo final de éste modelo con la energía que aportaría el hidrógeno del depósito se tiene que:

$$\frac{E_t}{PCI_d} = \frac{36758,4}{724950} * 100 = 5,07\%$$

– Modelo HydroPac

Consumo específico: $E_e = 192,17\text{ kJ}/\text{Nm}^3$

$$E_t = 192,17\text{ kJ}/\text{Nm}^3 * 67,2\text{Nm}^3 = 12913,8\text{ kJ}$$

Comparando el consumo final de éste modelo con la energía que aportaría el hidrógeno del depósito se tiene que:

$$\frac{E_t}{PCI_d} = \frac{12913,8}{724950} * 100 = 1,8\%$$

Hay que tener en cuenta que lo más probable es que estos compresores no tengan una relación de compresión tan alta para suministrar el hidrógeno a 700 bar, absorbiéndolo a 10 bar, que es la presión a la que comunmente se produce el hidrógeno en los electrolizadores. Entonces, sería necesario llevar previamente el hidrógeno a una presión intermedia, una solución común suele ser almacenarlo en depósitos de media presión a 200 bar y posteriormente elevarlo a la presión deseada para alimentar al depósito del vehículo.

En cualquier caso, observando la comparativa, se observa que el compresor de membrana PDC-13(100) y el tipo booster de HydroPac, son los más aptos para trabajar a altas presiones, ya que ofrecen un consumo considerablemente menor que el resto y son capaces de llenar completamente un vehículo de 6 kg de hidrógeno en unos 2 y 7 minutos respectivamente.

Entre los dos modelos nombrados en el párrafo anterior no se realizará ninguna selección ya que cada modelo tiene ventajas en ciertos aspectos, por ejemplo el modelo de PDC Machines, es capaz de trabajar a una presión mayor y de mover más caudal, sin embargo el modelo de HydroPac tiene un consumo considerablemente inferior.

4.3.2. Gastos económicos

Una vez se ha calculado los gastos en términos de energía de rellenar un depósito de hidrógeno, simplemente poniendo un precio a esa energía y conociendo cuánto cuesta producir un kg de hidrógeno podremos tener una estimación del coste de disponer de hidrógeno a presión para un vehículo de pila de combustible.

Fijaremos el precio de la energía para consumidor industrial en España en 0,1 €/kWh.

Al analizar catálogos de diferentes fabricantes se observa que el consumo medio de un electrolizador es de unos 5,2 kWh/ Nm³, con lo cual, el consumo energético de producir el hidrógeno para llenar completamente un depósito de 67,2 Nm³ scendería a 349,4 kWh

Como hemos apuntado antes, es probable que los dos modelos de compresores que vamos a estudiar en ésta sección necesiten ser alimentados a una presión intermedia que estimaremos de 200 bar y para la cual estudiando una serie de modelos de compresores, se llega a un consumo medio de compresión de 600 kJ/Nm³. Lo cual supone un consumo total de llenado del depósito de unos 10,45 kWh.

Conociendo estos datos se puede calcular el precio de rellenar un vehículo con los dos compresores antes nombrados:

– Modelo PDC Machines

Consumo de compresión del modelo: 6,31kWh

$$C(\text{€}) = 0,1 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) * (349,4 + 10,45 + 6,31)(\text{kWh}) = 36,62 \text{ €}$$

– Modelo HydroPac

Consumo de compresión del modelo: 3,59 kWh

$$C(\text{€}) = 0,1 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) * (349,4 + 10,45 + 3,59)(\text{kWh}) = 36,34 \text{ €}$$

Cabe destacar que estos precios orientativos se refieren a los costes de operación de producir y comprimir el hidrógeno, a los cuales habría que sumarle otros costes como pueden ser los de capital, personal, mantenimiento de los equipos y beneficio empresarial entre otros que repercutirían enormemente en el incremento del precio del hidrógeno desde el punto de vista del consumidor final. Asimismo, tampoco se han tenido en cuenta posibles ayudas o subvenciones que podrían aportar los gobiernos para apoyar esta tecnología disminuyendo así sus costes desde el punto de vista del consumidor.

5 DISEÑOS NO COMERCIALES

Sólo la imaginación es más importante que el conocimiento

- Albert Einstein -

Se han mostrado hasta ahora los distintos tipos de diseños de compresores de hidrógeno a alta presión que existen en el mercado hoy en día, los cuales son bastante similares a los compresores convencionales. Sin embargo, actualmente se están desarrollando una gran variedad de diseños de compresores específicos para hidrógeno que podrían ayudar a reducir los consumos de compresión de este gas. En este capítulo se mostrarán los diseños más importantes capaces de trabajar a alta presión.

5.1. Compresor de líquido iónico

Este diseño, patentado por la empresa Linde, se basa en un compresor de pistón convencional con la diferencia que cada pistón se encuentra sellado por una columna de líquido iónico casi incompresible, el cual es el que actúa sobre el hidrógeno para comprimirlo. Además, este líquido iónico tiene función separadora de evitando que se contamine el hidrógeno con la lubricación del pistón y minimiza las fugas de hidrógeno a través del pistón.

A continuación se muestra una fotografía de un compresor de este tipo y un esquema explicativos



Figura 5-1 Fotografía de compresor de líquido iónico

Aunque este líquido iónico apenas se mezcla con el hidrógeno durante el proceso de compresión y no supone una contaminación importante para el gas, es necesario añadir al final de la última etapa un separador, el cual se encarga de devolver a los pistones el líquido que pudiera haberse mezclado con el hidrógeno.

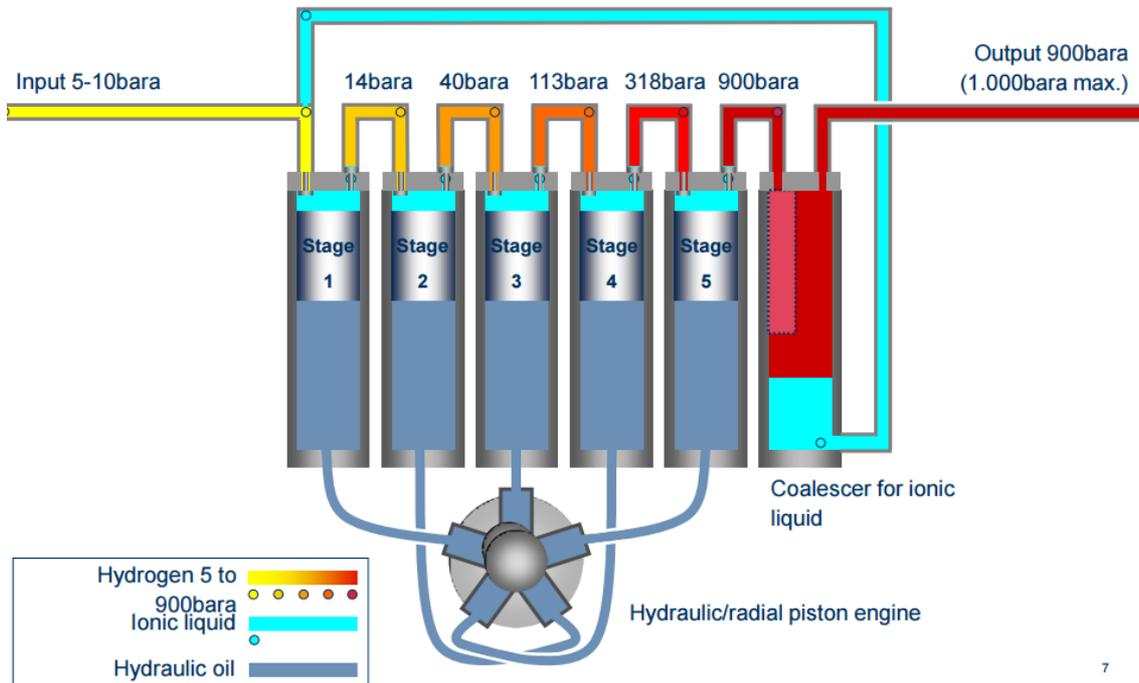


Figura5-2 Esquema de un compresor de líquido iónico instalado con el separador

Este compresor se instala en un mismo modulo junto con el separador y las botellas de almacenamiento así como un enfriador, de manera que tras comprimirse el hidrógeno pasa por el separador, para devolver el líquido iónico remanente en el gas, tras esto se envasa en botellas de hasta 1000 bar.

A la hora de repostar, el gas se deja escapar de las botellas y comienza a pasar a través del enfriador donde alcanza temperaturas de -40°C antes de entrar al vehículo por simple diferencia de presiones, sin necesidad de otro compresor intermedio. Según asegura la empresa Linde, este sistema es capaz de llenar el depósito de un FCEV en menos de 3 minutos.

Las principales ventajas de este compresor son:

- No hay contaminación de hidrógeno (u otros gases).
- Ambientalmente seguro.
- Buena capacidad térmica.
- Buenas cualidades lubricantes.
- Inhibición de la corrosión.
- Eliminación de los sellos y los cojinetes en el compresor ya que líquidos iónicos no se mezclan con el hidrógeno.

5.2. Compresor electroquímico

El principio de funcionamiento de este compresor se basa en separar los átomos de hidrógeno en un protón y un electrón aplicándole una diferencia de potencial entre un ánodo y un cátodo separados por una membrana de intercambio protónico (PEM). Denominándose al conjunto completo MEA, por sus siglas en inglés de Membrane-Electrode-Assembly.

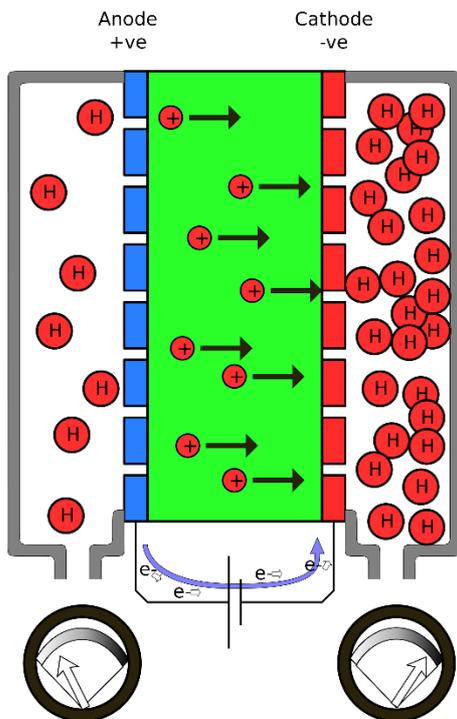


Figura 5-3 Esquema de compresor electroquímico



Figura 5-4 Compresor electroquímico

La ventajas principales de estos compresores son en primer lugar la ausencia de partes móviles, evitándose así las pérdidas por fricción, y en segundo lugar que el proceso es aproximadamente isotermo, por lo que se consigue una eficiencia de compresión muy elevada. Se muestra en la gráfica siguiente la comparación de consumos según diferentes procesos de compresión.

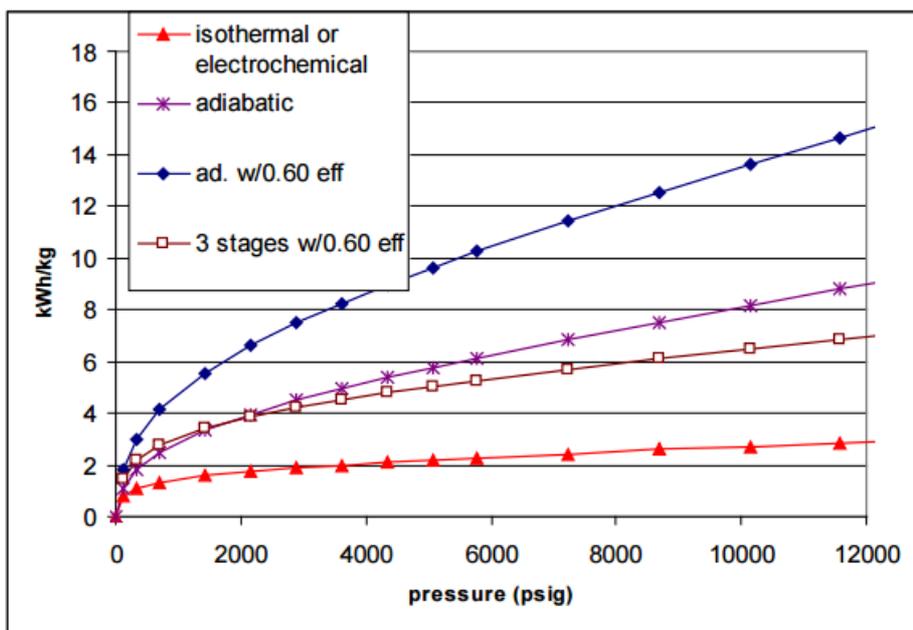


Figura 5-5 Comparativa de consumos de varios procesos de compresión

Estos compresores han evolucionado notablemente en los últimos años superando entre otros los siguientes obstáculos:

- Presión de salida superior a 800 bar.
- Relación de compresión de 800:1.
- Más de 5000 horas de operación a elevada densidad de corriente (750 mA/cm²).

5.3 Compresor de hidruro

El compresor de hidruro metálico es un sistema, muy parecido al almacenamiento en hidruros metálicos, basado en la absorción de hidrógeno por una matriz metálica que al ser calentada, normalmente con vapor de agua, a cierta temperatura, libera es capaz de liberar el hidrógeno a presión elevada.

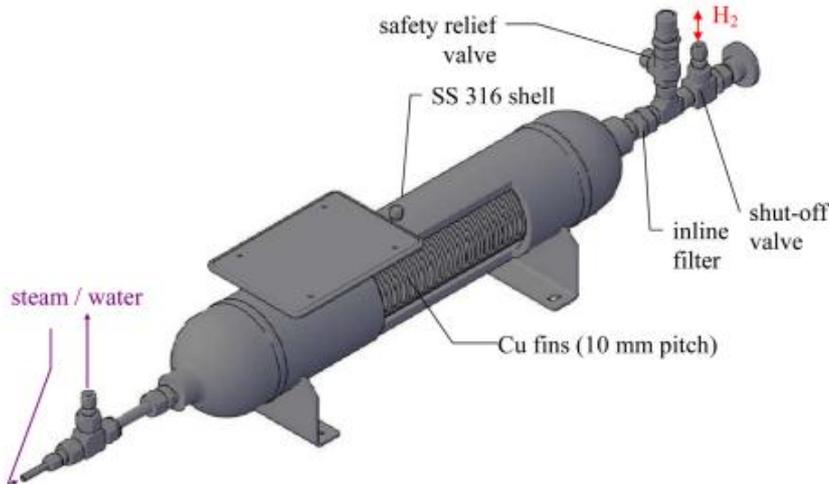


Figura 5-6 Esquema de compresor de hidruros metálicos

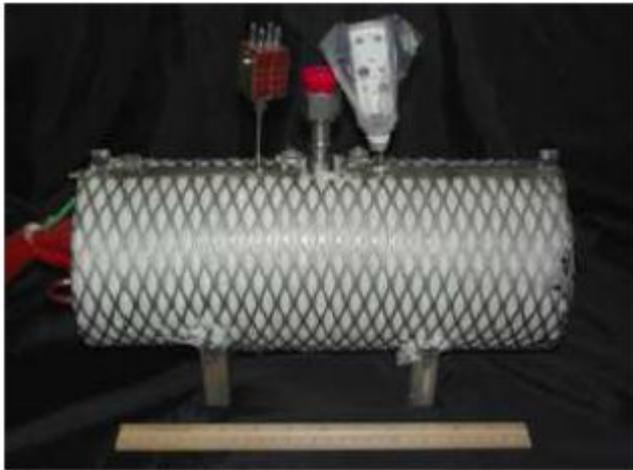


Figura 5-7 Compresor de hidruro de 3 etapas para isótopos de hidrógeno (620 bar)

La temperatura de operación variará enormemente dependiendo del tipo de matriz y de la presión de salida que se requiera, evolucionando la presión exponencialmente con la temperatura. Siendo posible alcanzar presiones de hasta 5000 bar a altas temperaturas.

Una forma de incrementar la eficiencia energética del proceso de compresión es aumentar la temperatura de aporte de calor, no obstante, los hidruros metálicos tradicionales, se degradan con temperaturas superiores a los 100°C.

Por tanto, un reto importante para la evolución de este tipo de compresores es la investigación sobre materiales alternativos resistentes a impurezas y altas temperaturas, que además ofrezcan una velocidad de absorción y desorción del hidrógeno en la matriz metálica.

6 CONCLUSIONES

*La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir
de datos insuficientes
- Samuel Butler-*

En el presente documento se han detallado las propiedades del hidrógeno y la situación actual de su tecnología y sistemas de compresión, así como los análisis de consumos energéticos y costes económicos. En este apartado de conclusiones se repasarán los aspectos generales vistos en este trabajo y se analizarán su repercusión en cuanto a la evolución de la tecnología del hidrógeno en un futuro a corto y medio plazo.

Este trabajo está enfocado a la compresión de hidrógeno con fines de repostaje de FCEVs, por considerarse el primer paso para conseguir una economía de escala.

En primer lugar en cuanto a las propiedades termodinámicas del hidrógeno, la principal desventaja es la baja densidad que presenta en comparación con cualquier otra sustancia, de ahí la necesidad de comprimir el hidrógeno a alta presión con el fin de almacenarlo en un espacio reducido y de esta manera utilizarlo en aplicaciones móviles. Por otra parte, el hidrógeno resulta ser la sustancia más difícil de comprimir y almacenar, por su reducido tamaño molecular y densidad fundamentalmente.

Los motivos expuestos hasta ahora justifican la apremiante necesidad de mejorar los sistemas de compresión actuales y desarrollar otros nuevos, que no solo beneficiarían a la tecnología del hidrógeno sino que contribuirían a la mejora de otros procesos que utilicen la compresión.

Se ha observado a lo largo de este documento que existen numerosas soluciones para obtener el hidrógeno a alta presión con el objetivo de repostar vehículos de pila de combustible en un tiempo aceptable. Además de las soluciones ya existentes, se está innovando en este campo, desarrollándose nuevos sistemas de compresión de hidrógeno que podrían sustituir a los actuales en un futuro cercano.

En cuanto al análisis de costes, se observa que en la actualidad, el precio de llenado del depósito de un FCEV podría conseguirse a un precio parecido al de un vehículo de gasolina convencional. No obstante la principal diferencia que existe está en la inversión inicial necesaria para la obtención de equipos de producción, compresión, almacenamiento y consumo de hidrógeno.

Una vez visto que en la actualidad es posible repostar un vehículo de hidrógeno a un precio no demasiado elevado, y que la tecnología del hidrógeno se encuentra aún en desarrollo, se puede concluir que esta tecnología es sin duda una clara opción energética en el futuro que compita en el mercado y ayude a la integración definitiva de las renovables, al producirse el hidrógeno a través de estas fuentes de energía.

A pesar de que todas las ramas de la tecnología del hidrógeno se encuentran en proceso de mejora, un factor determinante para impulsar la investigación y el desarrollo en este ámbito sería un incremento de la demanda de hidrógeno con fines energéticos, ya que esto disminuiría los costes de producción y motivaría la inversión en I+D, ayudando así a la creación de la deseada economía de escala del hidrógeno gracias al llamado “Learning by doing”.

REFERENCIAS

Almacenamiento de hidrógeno en microesferas de vidrio

<http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review05/stp_47_hall.pdf>

Características del hidrógeno y su tecnología

<<https://www.uclm.es/profesorado/afantinolo/curso%20de%20catalisis/Puertollano2005/ponencia10.pdf>>

Catálogo de compresores Haskel

<http://www.haskel-europe.com/StaticFiles/MRContent/StaticFiles/Haskel%20Europe/en/PDF;s/Haskel_Hydrogen_6-19-13.pdf>

Compresor de hidruro

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914002389>>

Compresor de líquido iónico

< http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/conferences/2014/papers/01_linde_mayer.pdf >
<http://www.lindeus.com/en/innovations/hydrogen_energy/fuelling_technologies/ionic_compressor.html>

Compresor electroquímico

< http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review12/pd048_lipp_2012_o.pdf >

Información sobre electrolizadores

http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-1-1-industrial-brochure_english.pdf?sfvrsn=2

Métodos de producción de hidrógeno

<http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion>

Oferta de compresores HydroPac

<<http://www.hydropac.com/HTML/hydrogen-compressor.html>>

Oferta de compresores Kajitech

< <http://www.kajitech.com/products/pro-fc/vd4-75gh-ol.html> >

Oferta de compresores PDC Machines

< <http://www.ariema.com/productos/PDC%20Machines-ARIEMA1.pdf> >

Oferta de compresores Toyokoatsu

<<http://www.toyokoatsu.co.jp/> >

PDC Machines compresores tipo diafragma metálico

< <http://www.pdcmachines.com/diaphragm-compressors/> >

Precio de la Energía en España

<http://www.minetur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV_12.pdf>

Principales técnicas de almacenamiento de hidrógeno.

<<http://estherguervos.galeon.com/4alm.pdf>>

Producción de hidrógeno por reformado de combustibles

<<http://www.textoscientificos.com/quimica/amoniaco/produccion>>

Propiedades del hidrógeno

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp> >

<<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>>

