

# **ESTUDIO COMPARATIVO DEL USO DE HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES FÓSILES EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA EN BUQUES.**

José J. de Troya Calatayud\* – Ing. Naval – Universidad de La Coruña

Luis Carral Couce - Doctor Ing. Naval - Universidad de La Coruña

Carlos Álvarez Feal - Doctor Ingeniero del ICAI - Universidad de La Coruña

M<sup>a</sup> Jesús Rodríguez Guerreiro – Dra. en Biología - Universidad de La Coruña

\*Profesor Asociado. Departamento de CC de la Navegación – Área de  
Construcciones Navales – Universidad de La Coruña

E.T.S. de Náutica y Máquinas – Paseo de Ronda 51. 15011. La Coruña. España

Tel 34981167000 (ext 4312); Fax: 34981167101

e-mail: [troya@udc.es](mailto:troya@udc.es)

## **INDICE**

- 1.- Introducción.
- 2.- Propiedades del hidrógeno.
  - 2.1.- Propiedades físicas del hidrógeno.
  - 2.2.- Propiedades químicas del hidrógeno.
  - 2.3.- Propiedades combustibles del hidrógeno.
- 3.- Almacenamiento del hidrógeno.
  - 3.1.- Gas a alta presión (CGH<sub>2</sub>)
  - 3.2.- Hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>)
  - 3.3.- Otros métodos de almacenaje.
- 4.- Adaptaciones necesarias de los motores.
- 5.- Potencia obtenida en el motor de hidrógeno.
- 6.- Situación actual en el desarrollo de los motores de hidrógeno.
- 7.- Aplicación del motor de hidrógeno en el ámbito naval.
- 8.- Bibliografía.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El modelo energético actual, basado en los combustibles fósiles, presenta serios problemas de sostenibilidad. Por ello, resulta evidente la necesidad de buscar nuevas alternativas energéticas. La escasez de petróleo, con su consecuente encarecimiento, y la normativa ambiental de emisiones, cada vez más restrictiva, hacen del hidrógeno un vector energético atractivo.

Tanto en el ámbito estacionario como en la industria del automóvil, se han realizado avances importantes. La obtención de electricidad a partir de la combinación del oxígeno con el hidrógeno ha dado lugar a la pila de combustible, existiendo múltiples tipos en función de sus diferentes aplicaciones.

Sin embargo, el uso de hidrógeno directamente en motores de combustión interna (MCI) es técnicamente viable con algunas modificaciones realizadas en los motores. Esta aplicación es de interés en el ámbito naval, dado que hasta el momento, la única aplicación del hidrógeno a bordo ha sido su uso en células de combustible.

## **2.- PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO**

### **2.1.- Propiedades físicas del hidrógeno**

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos y el más abundante del universo. Bajo condiciones ordinarias en la tierra, el hidrógeno existe como gas diatómico, H<sub>2</sub>, incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794 kg/mol.

Es aproximadamente 14 veces más ligero que el aire y se difunde más rápido que cualquier gas. Enfriándolo, se condensa a líquido a -253°C y a sólido a -259°C. Las propiedades físicas del hidrógeno, se resumen en la Tabla 1. El hidrógeno ordinario tiene una densidad de 0,09 kg/m<sup>3</sup>.

PROPIEDAD	VALOR
Peso molecular	2,01594
Densidad del gas a 0°C y 1 atm.	0,08987 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del sólido a -259°C	858 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del líquido a -253°C	708 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de fusión	-259°C
Temperatura de ebullición a 1 atm.	-253°C
Temperatura crítica	-240°C
Presión crítica	12,8 atm
Densidad crítica	31,2 kg/m <sup>3</sup>
Calor de fusión a -259°C	58 kJ/kg
Calor de vaporización a -253°C	447 kJ/kg
Conductividad térmica a 25°C	0,019 kJ/(ms°C)
Viscosidad a 25°C	0,00892 centipoise
Calor específico (C <sub>p</sub> ) del gas a 25°C	14,3 kJ/(kg°C)
Calor específico (C <sub>p</sub> ) del líquido a -256°C	8,1 kJ/(kg°C)
Calor específico (C <sub>p</sub> ) del líquido a -256°C	2,63 kJ/(kg°C)

Tabla 1.- Propiedades del hidrógeno (adaptada de (7))

Tiene baja solubilidad en solventes; por ejemplo, en condiciones ambientales, sólo 0,018 y 0,078 mL de gas H<sub>2</sub> se disuelve en un mililitro de agua y etanol, respectivamente. Sin embargo la solubilidad es mucho más pronunciada en los metales. El paladio es especialmente notable a este respecto. La adsorción de hidrógeno en acero puede causar “fragilización por hidrógeno” que puede afectar a los tres sistemas básicos de cualquier industria que lo emplee:

- Producción.
- Transporte/Almacenamiento.
- Utilización.

Las aleaciones que son capaces de resistir a la fragilización por hidrógeno son:

- Acero inoxidable (austenita).
- Aleaciones de cobre.
- Aleaciones de aluminio.

Por otro lado, las aleaciones que no se recomienda utilizar con hidrógeno, por resultar poco resistentes a la fragilización son:

- Aleaciones de hierro (ferrita, martensita y bainita).
- Titanio y aleaciones de titanio.
- Algunas aleaciones de níquel.

## **2.2.- Propiedades químicas del hidrógeno**

Desde el punto de vista de la seguridad podemos destacar:

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno en aire seco a una presión de 101,3 kPa y a una temperatura de 25°C son de 4,1% y 74,8%, para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de 4,1% y 94%. Una reducción en la presión por debajo de 101,3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

Como consecuencia, incluso las pequeñas fugas de hidrógeno corren el peligro de incendiarse o estallar. Si además nos encontramos en un recinto cerrado, la fuga de hidrógeno puede concentrarse, de tal modo que se aumenta el riesgo de combustión y explosión.

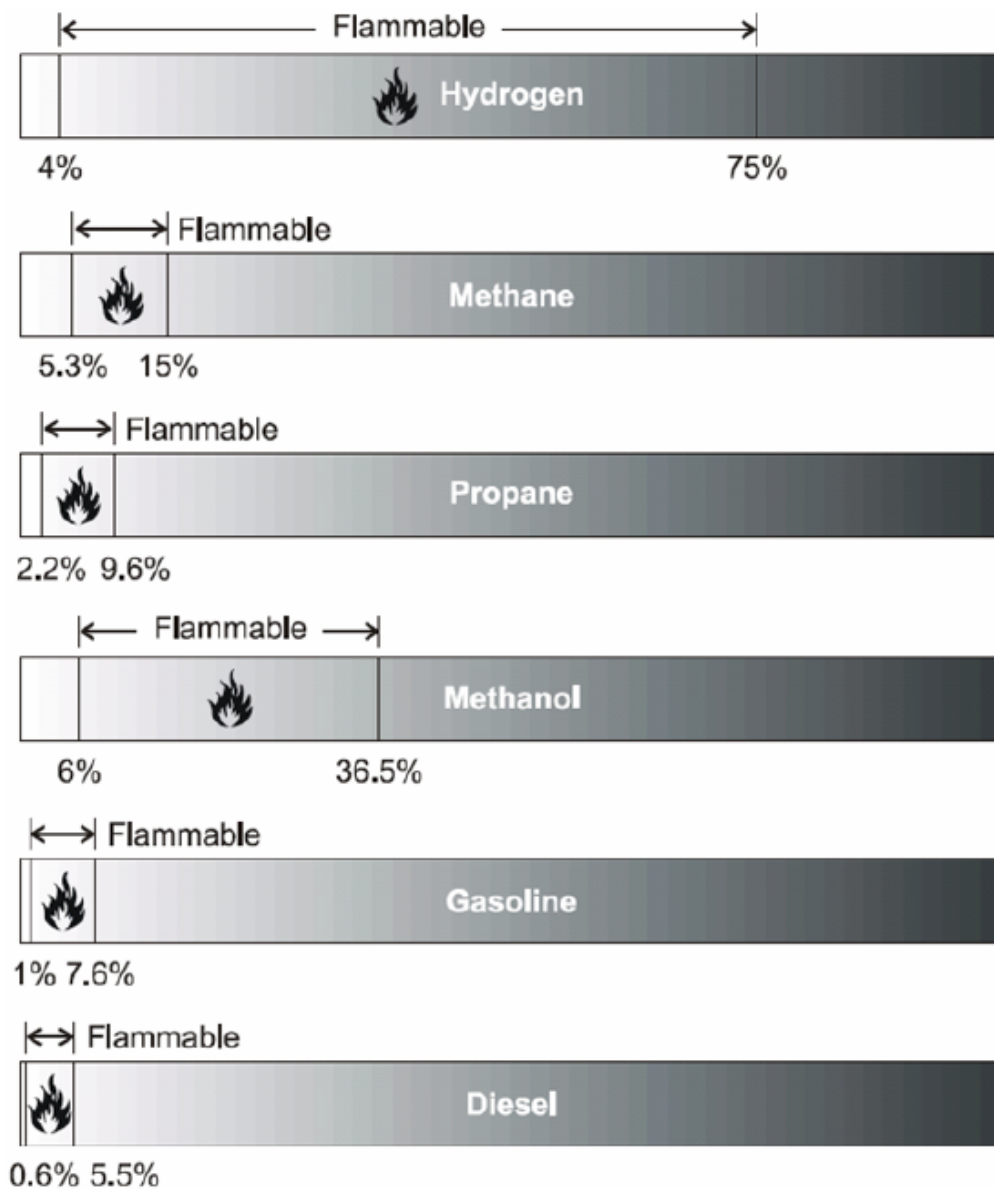


Figura 1.- Límites de inflamabilidad.

Para el hidrógeno, la temperatura de autoencendido es relativamente alta (unos 558°C). Esto hace que sea difícil prender una mezcla de aire/hidrógeno únicamente con calor, sin una fuente adicional de ignición (una chispa por ejemplo).

Aunque el hidrógeno tenga una temperatura más elevada de autoencendido que el metano, el propano o la gasolina, su energía de ignición de 0,02 mJ es mucho más baja y resulta más propenso a inflamarse. Incluso una chispa invisible o una descarga de electricidad estática procedente del cuerpo humano (en condiciones secas) pueden tener la suficiente energía como para provocar su ignición.

Además, el hidrógeno tiene la característica agregada de la baja electroconductividad, de modo que el flujo o la agitación del gas o líquido de hidrógeno puede generar cargas electrostáticas que pueden dar lugar a chispas. Por esta razón, el equipo que transporta el hidrógeno debe disponer de una toma de tierra.

### **2.3- Propiedades combustibles del hidrógeno.**

Las propiedades del hidrógeno que contribuyen a usarlo como combustible son:

- Amplia gama de inflamabilidad.

Puede ser quemado en un motor de combustión interna sobre una amplia gama de mezclas aire/combustible. El hidrógeno puede funcionar aún en una mezcla pobre, es decir, donde la cantidad de combustible es menor que la cantidad estequiométrica necesaria para la combustión con una cantidad dada de aire.

La economía del combustible suele ser mayor y la reacción de combustión es más completa cuando un motor funciona con una mezcla pobre de aire/combustible. Además, la temperatura final de la combustión es generalmente más baja, reduciéndose los óxidos de nitrógeno.

- Baja energía de ignición.

La energía para prender el hidrógeno es menor que para la gasolina. Esto permite que los motores de combustión interna de hidrógeno puedan quemar mezclas pobres. Esta baja energía de ignición significa que los gases calientes y las partes calientes del cilindro pueden actuar como fuentes de ignición. Esto conlleva una serie de cambios en los motores:

- o Las bujías deben ser de tipo fría sin punta de platino (el platino es un catalizador).

- El aceite lubricante debe ser sintético, con el fin de evitar la pirólisis causada por pequeñas zonas calientes de la cámara de combustión
  
- Pequeña distancia de apagado.  
La menor distancia de apagado puede incrementar también la tendencia a que se produzca el fenómeno de retroceso de llama, puesto que la llama de la mezcla aire/hidrógeno puede introducirse más fácilmente a través de una válvula de admisión entreabierta que si se tratase de una mezcla aire/gasolina.
  
- Temperatura de autoignición elevada.  
Permite usar mayores relaciones de compresión que en los motores alimentados por combustibles fósiles.
  
- Alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas.  
Esto significa que los MCI de hidrógeno podrán acercarse más al ciclo termodinámico ideal del motor.
  
- Elevada difusividad.  
Facilita la formación de una mezcla uniforme del combustible con el aire, en caso de producirse una fuga de hidrógeno, éste se dispersará rápidamente.
  
- Muy baja densidad.  
La baja densidad da lugar a dos problemas. En primer lugar afectará al volumen que ocupará el combustible en el interior del cilindro de almacenaje previo a la combustión, siendo necesario un gran volumen. En segundo lugar, el aumento de volumen del combustible reducirá la cantidad de aire que se puede introducir en el cilindro, hecho que repercutirá directamente en una disminución de la potencia obtenida.

Fuel	LHV (MJ/kg)	HHV (MJ/kg)	Stoichiometric		Flame Temperature (°C)	Min. Ignition Energy (MJ)	AutoIgnition Temperature (°C)
			Air/Fuel Ratio (kg)	Combustible Range (%)			
Methane	50.0	55.5	17.2	5–15	1914	0.30	540–630
Propane	45.6	50.3	15.6	2.1–9.5	1925	0.30	450
Octane	47.9	51.1	14.7	0.95–6.0	1980	0.26	415
Methanol	18.0	22.7	6.5	6.7–36.0	1870	0.14	460
Hydrogen	119.9	141.6	34.3	4.0–75.0	2207	0.017	585
Gasoline	44.5	47.3	14.6	1.3–7.1	2307	0.29	260–460
Diesel	42.5	44.8	14.5	0.6–5.5	2327		180–320

Tabla 2.- Comparación del hidrógeno con otros combustibles (Copiada de (7)).

Property	No. 2						
	Gasoline	Diesel	Methanol	Ethanol	Propane	CNG	Hydrogen
Chemical formula	C <sub>4</sub> –C <sub>12</sub>	C <sub>9</sub> –C <sub>25</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
Physical state	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Compressed gas	Compressed gas	Compressed gas or liquid
Molecular weight	100–105	200–300	32	46	44	16	2
Composition (wt%)							
Carbon	85–88	84–87	39.5	52.2	82	75	0
Hydrogen	12–15	13–16	12.6	13.1	18	25	100
Oxygen	0	0	49.9	34.7	NA	NA	0
Specific gravity (15.5°C/15.5°C)	0.72–0.78	0.81–0.89	0.796	0.796	0.504	0.424	0.07
Boiling temperature (°C)	27–225	190–345	68	78	–42	–161	–252
Freezing temperature (°C)	–40	–34	–97.5	–114	–187.5	–183	–260
Reid vapor pressure (psi)	8–15	0.2	4.6	2.3	208	2400	NA

Tabla 3.- Propiedades de combustibles convencionales y alternativos. (Copiada de (7))

Fuel	Energy Density (MJ/m <sup>3</sup> at 1 atm., 15°C)	Energy Density (MJ/m <sup>3</sup> at 200 atm., 15°C)	Energy Density (MJ/m <sup>3</sup> at 690 atm., 15°C)	Energy Density (MJ/m <sup>3</sup> of Liquid)	Gravimetric Energy Density (MJ/kg)
Hydrogen	10.0	1,825	4,500	8,491	140.4
Methane	32.6	6,860		20,920	43.6
Propane	86.7			23,488	28.3
Gasoline				31,150	48.6
Diesel				31,435	33.8
Methanol				15,800	20.1

Tabla 4.- Densidad de energía de combustibles. Poder calorífico inferior (Copiada de 7)

La relación estequiométrica de aire/combustible (A/C) para el hidrógeno y el aire es:

- A/C basado en masa = 34,33 : 1
- A/C basado en volumen = 2,4 : 1

El porcentaje de espacio ocupado en la cámara de combustión por una mezcla estequiométrica de hidrógeno es del 29,6%, en comparación con cerca del 1-2% desplazado en el caso de la gasolina.

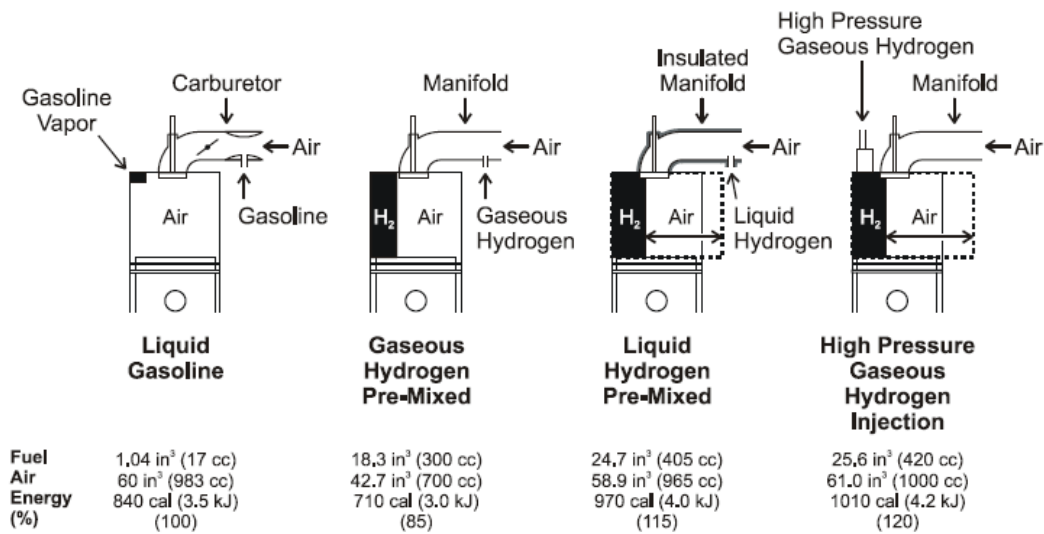


Figura 2.-Comparación del volumen de la cámara de combustión usando gasolina o hidrógeno.

Dependiendo del método que utilicemos para introducir el hidrógeno en la cámara de combustión, la energía obtenida a la salida comparada con la obtenida en un motor de gasolina (100%), variará desde el 85% (inyección por el colector de admisión) hasta el 120% (inyección a alta presión).

### 3.- ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

La baja densidad del hidrógeno, tanto si se encuentra en estado líquido como en gaseoso, da lugar también a una densidad de energía reducida. Dicho de otra manera, un volumen dado de hidrógeno contiene menos energía que el mismo volumen de otros combustibles. Esto aumentará también el tamaño relativo del

tanque de almacenaje, pues se requerirá mayor cantidad de hidrógeno para resolver los requisitos de cualquier vehículo.

De este modo, la mayoría de sistemas de almacenaje de hidrógeno son considerablemente más aparatosos y/o más pesados que los usados en caso de la gasolina o combustibles diesel.

Para ello existen dos alternativas: el almacenamiento como **gas a alta presión** o el almacenamiento como **líquido a temperaturas criogénicas**. Existen programas de investigación sobre otros sistemas de almacenaje, como los hidruros metálicos o las nanoestructuras de carbono, pero estos sistemas actualmente están aún en una fase inicial de desarrollo.

Se utilizan las siguientes denominaciones:

- LH<sub>2</sub>, hidrógeno líquido "Liquid Hydrogen".
- CGH<sub>2</sub>, hidrógeno gaseoso comprimido "Compressed Gaseous Hydrogen".
- LCGH<sub>2</sub>, hidrógeno líquido a gas comprimido "Liquid to Compressed Hydrogen", transformado en la misma hidrogenera.

Paradójicamente, la mejor forma de almacenar el hidrógeno es en forma de combustibles hidrocarburos, aunque requiere de sistemas adicionales para extraerlo.

### **3.1.- Gas a alta presión (CGH<sub>2</sub>)**

Es el sistema más común y desarrollado actualmente. Es el más sencillo, aunque las densidades energéticas son las menores a menos que se emplee alta presión, ya que la densidad energética depende linealmente de la presión si se asume un comportamiento como gas ideal. Las presiones de trabajo actuales son de 200 bar<sub>g</sub>, llegando a 700 bar<sub>g</sub> en los equipos más avanzados.

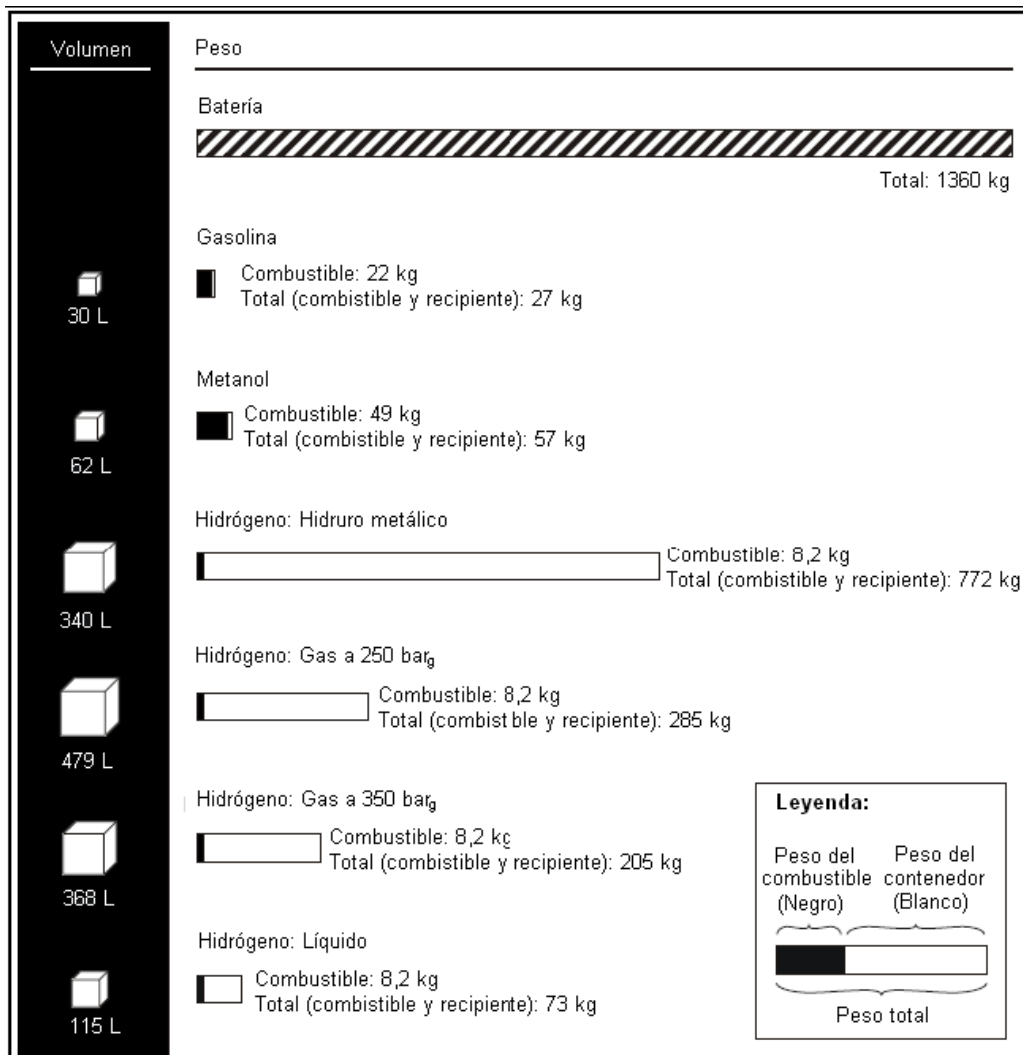


Figura 3.- Comparación del volumen ocupado por diferentes combustibles.

El transporte y suministro convencional de hidrógeno se efectúa en botellas de acero, similares a las que se usan para almacenar gas natural, a una presión de 200 bar<sub>g</sub>, para ser utilizado en procesos de soldadura y para inertizar atmósferas, entre otras aplicaciones. En los proyectos de demostración de vehículos movidos con hidrógeno se han empleado presiones superiores: los autobuses de Madrid y Barcelona (proyecto CUTE, año 2003) almacenan el hidrógeno a 350 bar<sub>g</sub>, mientras los proyectos más recientes (por ejemplo el Nissan X-Trail) han llegado hasta los 700 bar<sub>g</sub>.

No obstante, la tecnología empleada en la fabricación de las botellas o cilindros es muy diferente en cada caso. Todos ellos deberán construirse con paredes gruesas y con materiales de alta resistencia y muy duraderos.

### Tecnología de cilindros

Los cilindros para almacenamiento de gases a alta presión se dividen en cuatro categorías:

- Tipo I: Son las botellas tradicionales, hechas completamente de metal, generalmente de acero. Debido a su elevado peso, su uso para almacenar hidrógeno como combustible resulta inviable.
- Tipo II: Son cilindros de metal, generalmente aluminio, reforzado en su parte recta con materiales compuestos (fibras de vidrio o carbono), que ofrecen la ventaja de una reducción en peso frente a los de tipo I y que son los que normalmente se emplean en vehículos cuyo combustible es el gas natural.
- Tipo III: Estos cilindros están formados por una delgada capa metálica llamada liner, recubierta de materiales compuestos. Los materiales compuestos son los que soportan los esfuerzos mecánicos mientras que el liner evita el paso del hidrógeno. Estos cilindros soportan presiones superiores que los de tipo I y II, con lo que se reducen significativamente las necesidades de espacio al no tener que hacerse las paredes del cilindro tan gruesas.
- Tipo IV: Son cilindros como los de tipo III, pero el liner es un polímero en lugar de un metal. Trabajan con las mismas presiones y tienen un peso algo menor, sin embargo, la difusividad del hidrógeno a través del liner es mayor, lo que puede resultar un problema de seguridad y, por otro lado, soportan un número menor de ciclos de carga y descarga.

Los cilindros de tipo I y tipo II llegan a presiones de unos 300 bar<sub>g</sub>, mientras que los tipos III y IV tienen presiones de diseño de hasta 700 bar<sub>g</sub> cuando destinados a ir a bordo de un vehículo, y de hasta 800 bar<sub>g</sub> cuando van destinados a aplicaciones estacionarias.

Las altas temperaturas debidas a un ambiente caluroso, o como resultado de la compresión durante el aprovisionamiento de combustible, pueden aumentar la presión de almacenaje hasta un 10% o más. A pesar del peligro potencial, los cilindros de alta presión disponen de un excelente expediente de seguridad.

### **3.2.- Hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>)**

El hidrógeno líquido puede almacenarse sólo por debajo de su punto de ebullición, a - 253°C, o cerca de la presión ambiental en un tanque súper-aislante de doble pared (o tanque Dewar). Éste aislamiento es la parte fundamental de la tecnología de estos tanques y está formado por varias capas de vacío separadas por capas de fibras. Además, este aislamiento permite que el hidrógeno permanezca en estado líquido dentro del tanque hasta 10 días antes de que sea necesario expulsar parte del hidrógeno al exterior y, una vez que se empiecen a producir expulsiones, el ritmo de pérdida diaria es del 1% al 2% de su capacidad total.

El proceso de licuefacción de hidrógeno requiere mucha energía (entre el 30% y el 40% del contenido energético del hidrógeno licuado) y resulta tecnológicamente complejo.

El hidrógeno no se puede almacenar en estado líquido indefinidamente. Todos los tanques, no importa lo bueno que sea su aislamiento, permiten que una cierta cantidad de calor del ambiente de los alrededores se transfiera al interior del tanque. Este calor hará que el hidrógeno que hay en el interior del tanque se evapore, y por tanto la presión del mismo aumentará. Los tanques de almacenaje de hidrógeno líquido estacionarios, normalmente son de forma esférica, dado que esta forma geométrica ofrece la menor área superficial para un volumen dado, con lo que tendrá el área más pequeña de transferencia térmica.

### **3.3.- Otros métodos de almacenaje**

Existen una serie de métodos alternativos de almacenaje de hidrógeno, aunque todavía se encuentran en fase de investigación y no resultan viables

comercialmente. Entre ellos, se encuentran los hidruros metálicos; la adsorción al carbón; las microesferas de cristal; y las técnicas de oxidación del hierro.

### Hidruros metálicos

Existen algunos metales que presentan cierta tendencia a combinarse con el hidrógeno. Los enlaces que se forman no suelen ser muy fuertes, lo cual permite que, con un poco de calor, puedan ser rotos. Así pues podemos aprovechar los gases calientes del escape para provocar la deserción del hidrógeno contenido en el metal. El proceso resulta totalmente reversible, de manera que podremos rellenar el depósito tantas veces como sea necesario.

### Adsorción al carbón

La adsorción al carbón es una técnica muy parecida a la empleada con los hidruros metálicos, en donde el hidrógeno se une químicamente sobre la superficie de los granos de carbón altamente porosos. El carbón es adsorbido entre - 185°C y - 85°C, y a presiones entre los 21 y los 48 bar<sub>g</sub>. La cantidad de adsorción de carbón aumenta con las temperaturas más bajas. Temperaturas por encima de los 150°C hacen expulsar el hidrógeno.

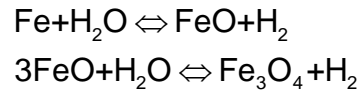
### Microesferas de cristal

Los sistemas de almacenaje de hidrógeno mediante microesferas de cristal utilizan bolas huecas y minúsculas de cristal (de unas pocas millonésimas de metro de diámetro), en el interior de las cuales el hidrógeno es forzado bajo muy altas presiones.

Una vez que se ha introducido el hidrógeno a alta presión y temperatura, las microesferas se pueden almacenar en condiciones normales de temperatura y presión (ambientales), sin que sufran pérdidas del hidrógeno que contienen. Posteriormente, las microesferas se introducen en un tanque de baja presión, y se calientan de nuevo. El calor provocará que el hidrógeno sea expulsado del interior de las microesferas, quedando almacenado en el tanque.

### Oxidación del hierro

La oxidación del hierro es un proceso mediante el cual el hidrógeno es formado cuando el hierro esponjoso (la materia prima para la fabricación de hornos siderúrgicos) reacciona con el vapor de la siguiente manera:



El subproducto de este proceso es la herrumbre. Una vez que el hierro se haya oxidado por completo, debe ser introducido en un nuevo tanque y reconvertido en hierro esponjoso mediante procesos industriales.

El vapor y el calor necesarios para la reacción pueden ser potencialmente suministrados mediante los gases de escape del motor de combustión interna.

Aunque el hierro es barato, es muy pesado, con lo que el proceso es eficaz sólo un 4,5%. Además, se requiere el uso de un catalizador (que es costoso) para mantener la reacción a las temperaturas de entre 80°C y 200°C.

## **4.- ADAPTACIONES NECESARIAS DE LOS MOTORES**

La principal ventaja de utilizar hidrógeno en motores de combustión interna es que podemos aprovechar toda la experiencia tecnológica acumulada en este campo. De todas las modificaciones que hay que hacer en el motor de gasolina, son de especial relevancia las que afectan al sistema de suministro de combustible.

### **Sistemas de suministro de combustible**

Existen tres sistemas de suministro de hidrógeno al motor: carburación, por conducto e inyección directa.

- Carburación: Es el método más simple, no se requiere una presión de suministro del combustible tan elevada como en otros métodos de suministro. El inconveniente es que resulta más susceptible a la

combustión irregular, problemas de preencendido y retroceso de llama. La mayor cantidad de mezcla aire/hidrógeno dentro del conducto de admisión agrava los efectos del preencendido.

- Sistemas de inyección por conducto (PIF: Port Injection Fuel): Este sistema inyecta el combustible directamente dentro del conducto de admisión en cada orificio de admisión, en vez de introducir el combustible en un único punto.
- Inyección directa: Es el sistema más sofisticado. En la inyección directa, la válvula de admisión se encuentra cerrada cuando se inyecta el combustible. La potencia obtenida usando un sistema de inyección directa en un motor de hidrógeno es un 20% mayor que en un motor de gasolina, y un 42% mayor que en el caso de usar carburador en un motor de hidrógeno.

Otro aspecto a tener en cuenta de la inyección del combustible en los motores de hidrógeno, es que ésta puede realizarse de dos maneras en cuanto a temperaturas se refiere, inyectando hidrógeno a temperatura ambiente o bien criogenizado. Este último tiene la ventaja de que al entrar el combustible a una temperatura extremadamente baja en la cámara de combustión, se potencia el llenado del cilindro, lo que se traduce en un aumento de potencia y rendimiento del motor, que llegará a equiparlo a los actuales motores de combustión interna de gasolina.

## **5.- POTENCIA OBTENIDA EN EL MOTOR DE HIDRÓGENO**

La potencia obtenida en un motor de hidrógeno dependerá de la relación aire/combustible y del sistema de inyección de combustible utilizado.

Puesto que tanto el método de carburación como la inyección en el conducto de admisión mezclan el aire y el combustible antes de que entren en la cámara de combustión, estos sistemas limitarán la potencia teórica máxima obtenible a

aproximadamente un 85% de la obtenida en los motores de gasolina. Para los sistemas de inyección directa, que mezclan el combustible con el aire después de que la válvula de admisión se haya cerrado, la potencia máxima a la salida del motor puede ser aproximadamente un 15% mayor que la de los motores de gasolina.

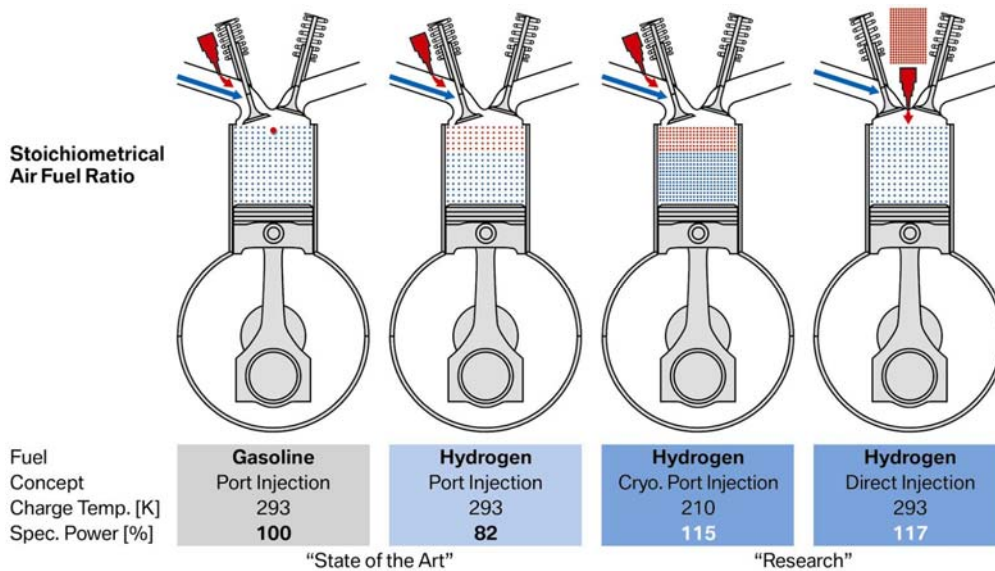


Figura 3.- Diferentes sistemas de suministro de hidrógeno

Puesto que una de las razones de utilizar motores de hidrógeno es la de no emitir agentes contaminantes a la atmósfera, éstos estarán diseñados para funcionar con mezclas de aire/combustible pobres, y no con una relación estequiométrica.

Los motores de hidrógeno se diseñan para funcionar con dos veces más aire del teóricamente requerido para producir una combustión completa. Con esta relación la formación de NOx se reduce casi a cero. Desafortunadamente, este hecho reducirá también la potencia máxima a la salida hasta más o menos la mitad que se conseguiría con un motor de gasolina de las mismas características. Para compensar la pérdida, los motores de hidrógeno son generalmente más grandes que los motores de gasolina.

## 6.- SITUACIÓN ACTUAL EN EL DESARROLLO DE LOS MOTORES DE HIDRÓGENO.

Las investigaciones actuales se centran principalmente en el del transporte terrestre, destacando las investigaciones de BMW en su serie 7 y el proyecto HyCE de la Unión Europea.

### BMW Hydrogen 7

En el año 2000 presentó su modelo 750 hL, el primer vehículo propulsado a hidrógeno fabricado en serie en todo el mundo. El vehículo va equipado con un motor ambivalente de doce cilindros propulsado a hidrógeno y gasolina. Dispone de una autonomía de unos 350 kilómetros, gracias a los 140 litros de capacidad de su tanque criogénico en el que se almacena el hidrógeno.

Si llegaran a agotarse el hidrógeno y no hubiera una estación cercana, el vehículo cambiaría automáticamente al sistema de combustión convencional, utilizando gasolina como combustible, almacenada en un segundo tanque, y que le proporcionaría unos cientos de kilómetros de autonomía adicionales.

En el siguiente cuadro comparativo se puede observar las diferencias de rendimiento de dicho modelo respecto a su homólogo propulsado por gasolina.

MOTOR	BMW 750iL	BMW 750hL	BMW Hydrogen 7
Combustible	Gasolina súper	Hidrógeno	Hidrógeno
Número y disposición de cilindros	12 en V	12 en V	12 en V
Válvulas por cilindro	2	2	
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	5.379	5.379	5.972
Potencia máxima (CV/rpm)	243	204	260/5.100
<b>RENDIMIENTO</b>			
Velocidad máxima (km/h)	250	226	
Aceleración 0-100 km/h (seg.)	6,8	9,6	9,5
Aceleración 0-1000 m (seg.)	26,7	26,1	

Tabla 5.- Diferencias rendimiento entre motor gasolina e hidrógeno.

Hace unos años (marzo de 2007) BMW ha presentado su nuevo modelo "Hydrogen 7", construido sobre la base del actual serie 7. Al igual que su antecesor, el Hydrogen 7 dispone de un motor ambivalente de gasolina e hidrógeno, tiene un par máximo de 390 Nm a 4300 rpm, un consumo medio de 13,9 litros/100 km con gasolina y de 13,3 litros/100 km con hidrógeno. Cuenta con dos depósitos de combustible, uno de gasolina con una capacidad de 74 litros, y otro para el hidrógeno, de 8 kg de capacidad. Con el depósito de hidrógeno lleno dispone de una autonomía de 200 km, a los que se debe sumar 500 km más con el depósito de gasolina lleno.



Figura 4.- Depósito del BMW 750 hL

### Proyecto HyICE

El proyecto europeo de investigación HyICE, Hydrogen Internal Combustion Engine (Optimización de los Motores de Combustión Interna de Hidrógeno), coordinado por el Grupo BMW y que cuenta con la participación de once socios de cuatro estados miembros de la UE, ha dado pasos de gigante hacia la optimización de los motores de combustión interna a hidrógeno.

HyICE está estructurado en múltiples subproyectos que abarcan desde diferentes enfoques para la formación de la mezcla hasta el desarrollo de nuevos inyectores de hidrógeno apropiados para los principios específicos de formación de la mezcla

Uno de los éxitos ha sido la impresionante mejora de la eficiencia energética de los motores de hidrógeno, al conseguir una densidad de potencia de 100 kW por litro (kW/l) de desplazamiento, lo que equivale a una potencia de alrededor de 136 CV. Esto supera con creces el nivel medio de un motor diesel moderno para coche, que es de aproximadamente 77 kW/l ó 105CV.

## 7.- APLICACIÓN DEL MOTOR DE HIDRÓGENO EN EL AMBITO NAVAL

La investigación sobre el uso del hidrógeno en motores de combustión interna ha estado centrada hasta ahora en el transporte terrestre. Esto ha hecho que las potencias y los tamaños de los motores sobre los que se ha experimentado suelen ser pequeños y de gasolina. Como se ha señalado a lo largo de esta exposición, el motor de hidrógeno es una tecnología probada y viable, aunque sería conveniente la experimentación en motores diesel de mayor potencia para su incorporación al ámbito naval.

En los buques, el hidrógeno se ha utilizado para alimentar las pilas de combustible y su uso ha estado limitado a submarinos, equipo auxiliar, y pequeños buques de superficie.

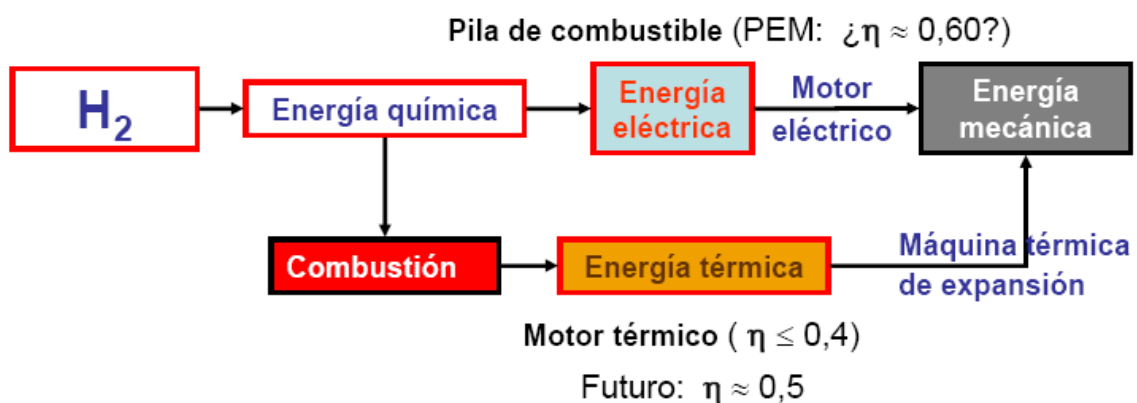


Figura 5.- Esquema de la célula de combustible versus motor de combustión interna.

La potencia disponible en las pilas de combustible, su peso y su volumen son los principales inconvenientes con los que se encuentra su aplicación en la propulsión naval.

Los principales inconvenientes para su uso como vector energético son dos: el elevado coste de producción y la inexistencia de una adecuada red de abastecimiento. En nuestro sector, esta red debería tener tanques de almacenamiento e “hidrogeneras” en los puertos. Como primer paso, se podría comenzar con una red de suministro a los puertos deportivos. Las embarcaciones de recreo pueden ser un buen comienzo para extender y dar a conocer estas tecnologías. El uso mayoritario de estas embarcaciones en aguas costeras con pequeños desplazamientos, potencia moderada y poca autonomía las hacen ideales para este tipo de propulsión, pudiendo incluso, disponer de un sistema de almacenamiento con cilindros de gas, que puede ser fijo a la estructura del barco o portátil. Como se ha visto, el almacenamiento en estado líquido del hidrógeno necesita un consumo que evite el aumento de temperatura y presión interiores, por lo que no es el más adecuado para unas embarcaciones con poco uso, o con uso estacional y esporádico.

Si se dispusiera de una red de suministro adecuada, el siguiente problema que se plantea para poder usar el hidrógeno en cualquier buque, sería su almacenamiento a bordo. En el caso de buques mercantes, el almacenamiento como gas sería inviable dado el volumen que ocuparía. Nos queda por tanto, mientras no haya una tecnología mejor, almacenarlo como líquido criogénico. A este respecto cabe destacar la amplia experiencia en almacenamiento y transporte de LNG y GLP de la que se dispone en la actualidad, debida al auge de estos mercados. La tecnología usada en este tipo de buques es perfectamente utilizable en el almacenamiento del hidrógeno.

Por último, la figura 6 muestra la distribución interior del barco fluvial de pasajeros ZEMSHIP-ZERO EMISSION SHIP, que dispone de propulsión por células de combustible y donde se puede observar el almacenamiento del hidrógeno en 12 botellas a 350 bar, con un total de 50 kg almacenados, repostándose en 30 minutos.

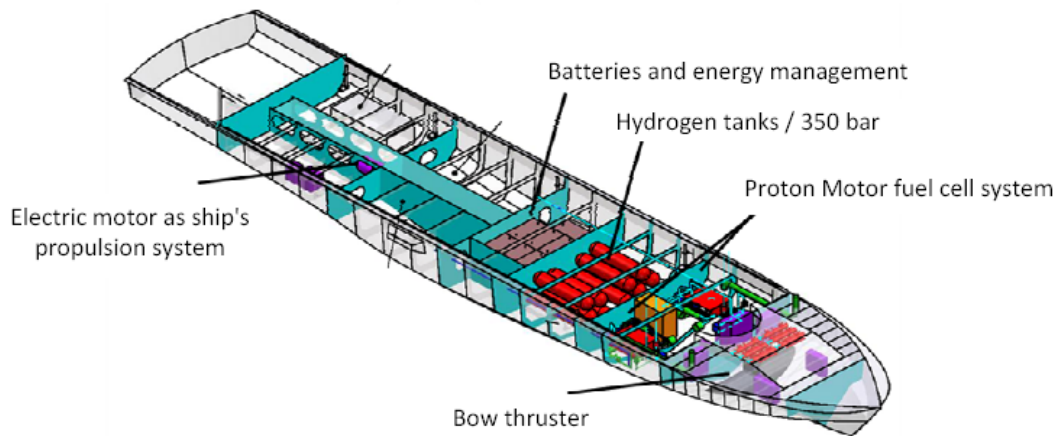


Figura 6.- Esquema de un buque propulsado con células de combustible.

El buque puede transportar 100 pasajeros, tiene una eslora de 25 metros, manga de 5 metros y calado de 1,3 metros. Su velocidad de crucero es de unos 8,1 nudos y tiene un sistema de células de combustible que le suministra 50 kW, de los que aproximadamente un 30% se utiliza en la propulsión.

Solventados estos problemas, el uso del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna en buques sería una opción tecnológicamente viable y defendible en el marco de una economía sostenible.

## 8.- BIBLIOGRAFÍA

1. Aguer Hortal, Mario. Miranda Barreras, Ángel L. 2007. El hidrógeno. Fundamento de un futuro equilibrado. Ed. Díaz de Santos.
2. BMW Media Information 11/2006. BMW Hydrogen 7.
3. Casanova Kindelán, Jesús. El hidrógeno como combustible en motores. Octubre 2009. 2ª Jornadas sobre la energía. La energía asociada al transporte. Gerona
4. College of the Desert. Module3. Hydrogen Use In Internal Combustion Engines.. Rev0, December 2001.
5. Fábrega Ramos, Marc. 2008-2009. Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna. Facultat de Náutica de Barcelona. UPC.
6. Fickel, Hans-Christian. Coordinador del proyecto de la UE: HyCE. Optimizacion of the Hydrogen Internal Combustion Engine. 2007.
7. Gupta, Ram B. Hydrogen Fuel. 2008. Production, Transport, and Storage. Ed. CRC Press
8. Layman Report. Zemships – Zero – Emission Ships. LIFE 06ENV/DE/465
9. Linares Hurtado, José Ignacio. Moratilla Soria, Beatriz Yolanda. 2007. El hidrógeno y la energía. Ed. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.