

UNIVERSIDAD CARLOS III
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE INGENIERÍA TÉRMICA

MOTOR DE COMBUSTIÓN DE HIDRÓGENO



Profesor: Antonio Lecuona Neumann
Alumno: Luis Antonio Cano Rodríguez

INDICE

Introducción	Pág. 2
Ventajas e inconvenientes del motor de hidrógeno	Pág. 5
Ventajas	Pág. 5
Inconvenientes	Pág. 6
Configuración del motor y prestaciones	Pág. 8
Motor Wankel	Pág. 8
Motor de cuatro tiempos	Pág. 10
Almacenamiento del hidrógeno	Pág. 11
Inyección	Pág. 14
Bibliografía	Pág. 16

INTRODUCCIÓN

De todos es sabido que la principal fuente de energía actual, es decir, el petróleo y sus derivados, no disponen de una vida ilimitada. Más bien al contrario, en unos 40 ó 50 años las reservas quedarán agotadas. Otro problema primordial derivado de la actual política energética es el de la contaminación. Según recientes estudios médicos, algunos de los contaminantes generados en la combustión de los hidrocarburos son responsables de numerosas enfermedades pulmonares, mientras que otros, como el monóxido de carbono en altas concentraciones, aumenta la probabilidad de sufrir un infarto. Estos contaminantes no sólo afectan directamente al ser humano, sino que también lo están haciendo de forma indirecta gracias al temido efecto invernadero, el cual puede llegar a provocar un fuerte cambio en el clima global de forma que se incrementarán los fenómenos climáticos extremos como huracanes, tifones, sequías, inundaciones, etc.

Otro problema de los combustibles derivados del petróleo es el de la diversidad geográfica, ya que el petróleo se encuentra concentrado en un pequeño número de naciones agrupadas en la O. P. E. P., organización que ya dio un toque de atención a la comunidad internacional con la crisis del petróleo de los años 70. Desde un punto de vista económico este es un gran inconveniente que se debería solucionar con la diversificación de las fuentes de energía, algo que el combustible que trataremos en este informe ayudará a conseguir.

Ahora bien, en última instancia, el problema más grave y que alzará a un puesto de privilegio a las energías renovables y a los combustibles ecológicos será la elevación del precio del petróleo a medida que se vaya agotando. Será entonces, y sólo entonces, cuando existirá un consenso global para la transición de un sistema energético a otro que sea sostenible. Afortunadamente, ya existen iniciativas en este sentido desde hace varios años, pero han chocado frontalmente con los intereses creados en torno a la industria del petróleo.

Son bastantes los años que se lleva investigando arduamente en el campo de las energías renovables con el fin de encontrar la solución a estos graves problemas. No obstante, las opciones más conocidas, como pueden ser la energía solar, eólica, nuclear, etc., no logran satisfacer la elevada demanda energética de los países desarrollados, y mucho menos lograrán suplir de energía a las naciones en desarrollo, al menos a corto plazo. La cuestión es que estas fuentes de energía sufren una serie de problemas, principalmente tecnológicos, que las convierten en inviables a la hora de satisfacer la demanda energética mundial de forma sostenible en la actualidad. Es de esperar que las investigaciones en estos campos avancen de forma que se consiga una producción energética suficiente y sostenible.

En este informe se tratará la aplicación del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna. El hidrógeno es considerado como la opción de futuro para sustituir al petróleo como fuente principal de energía, tanto en el campo de la automoción como en cualquier otro. Es un hecho que la mayor parte del combustible de origen fósil se emplea en el campo de la automoción y transporte, con lo que una gran parte de la contaminación será generada por vehículos. A causa de esto, resultará interesante promover e investigar el empleo de hidrógeno como combustible en motores de combustión interna.

El interés por el hidrógeno no es tan reciente como se puede creer, ya a finales del siglo XIX H. R. Ricardo concibió un motor de cuatro tiempos que empleaba esta sustancia como combustible. Como es de esperar este proyecto no produjo resultados totalmente satisfactorios, pues, en caso contrario, no estaríamos tratando este tema como novedad, sino

que estaríamos acostumbrados a ver automóviles emisores de agua. Dadas las especiales condiciones de combustión del hidrógeno, el motor no presentaba un buen comportamiento debido a problemas de autoencendido. De todos modos, el principal problema consistía en el almacenamiento, generación y manejo del, por aquel entonces, elemento recién descubierto. Varios años más tarde, cuando se comenzaron a construir los dirigibles, que eran básicamente globos de hidrógeno, un ingeniero alemán, Rudolph Erren, trabajó en un motor para estos aparatos cuyo combustible fuera el hidrógeno. Llegó a resolver los problemas de autoencendido en el carburador mediante la inyección directa y, de no ser por ciertos acontecimientos históricos y por el descubrimiento de grandes y accesibles yacimientos de petróleo, podría haber sido posible la construcción de dirigibles a hidrógeno. Por último, desde los años 70 se viene investigando con grandes dotaciones económicas el uso del hidrógeno como combustible. Por ejemplo, gracias a la carrera espacial entre la U. R. S. y los Estados Unidos se produjo un gran avance en el manejo del hidrógeno por sus ventajas en lo que a peso se refiere. El hidrógeno es el combustible menos denso que existe lo que lo hace ideal para los viajes espaciales. Es un hecho que los motores de los cohetes funcionan a base de hidrógeno y oxígeno y que, además, este hidrógeno se ha empleado también en la alimentación eléctrica de las misiones a la luna por medio de las células de combustible.

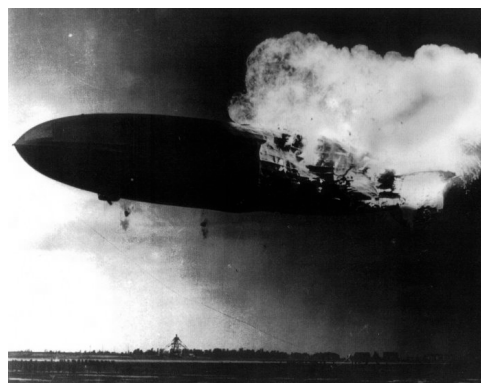


Figura 1. La explosión del Hindenburg

El hidrógeno también puede emplearse para almacenar electricidad, ya que los procesos implicados en la conversión del hidrógeno en energía eléctrica y viceversa gozan de buenos rendimientos. Consideremos el gran problema que plantean los valles de consumo eléctrico a las compañías del sector. En vez de reducir la producción, se podría aprovechar la energía sobrante en procesos de generación de hidrógeno por electrólisis. Por otro lado, la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno puede llevarse a cabo electrolíticamente, es decir, gracias a la reacción puede obtenerse energía eléctrica. De aquí que la aplicación de las células de combustible en automoción, las cuales se basan en esto último, sea un tema que está siendo muy investigado en los últimos años. Estos dispositivos también son considerados Z. E. V. (vehículos de emisión cero)¹ ya que la reacción consiste en la combinación de hidrógeno y oxígeno para dar agua de forma electrolítica y no existen productos de reacción secundarios, como los NO_x, al no darse combustión alguna. Ahora bien, el principal problema que presentan las células de combustible se encuentra en su alto coste de producción, amén de otros problemas menores como la alta sensibilidad ante impurezas, el problema del repostaje, etc. A pesar de conseguir unos muy altos rendimientos, las células de combustible se presentan como la fuente de energía más común a largo o muy largo plazo, tan pronto se desarrolle la tecnología involucrada y, con ello, se reduzcan los precios.

¹ Los vehículos de emisión cero se han definido como aquellos que producen unas emisiones menores que las generadas por las plantas de energía al alimentar un vehículo eléctrico



Figura 2. Célula de combustible

Aparte de todas las ventajas expuestas, la indudable ventaja con que cuenta el hidrógeno radica en que es prácticamente ilimitado, pues la materia prima de la que se extraería es el agua o de algunos hidrocarburos como el metanol o las gasolinas. Además, suponiendo que el método de producción del hidrógeno involucre energías renovables, síntesis electrolítica partiendo de energía solar por ejemplo, podemos conseguir un ciclo energético totalmente libre de emisiones pues el resultado de la combustión no es más que agua que volverá a ser empleada en la producción de más hidrógeno o bien en determinados procesos industriales que requieran el concurso del agua. De todos modos, tal y como apuntamos un poco más arriba, las energías renovables no se encuentran todo lo desarrolladas que sería de esperar con lo que la generación del hidrógeno se llevaría a cabo mediante otros procesos más sucios como la generación a partir de los hidrocarburos mencionados. Todo lo relatado en este último párrafo se resume en la siguiente figura:

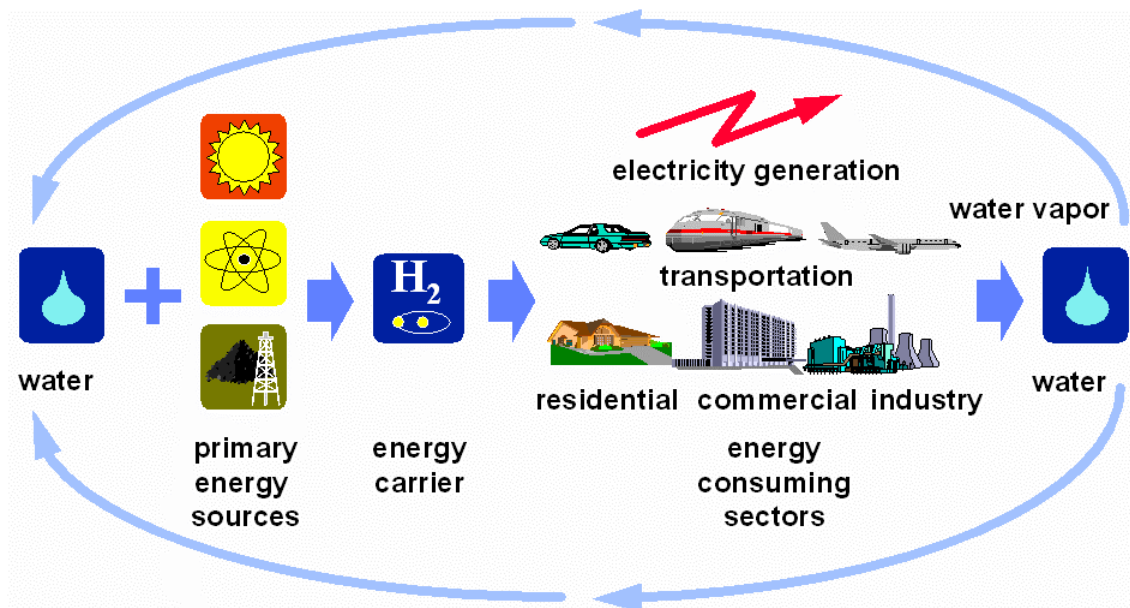


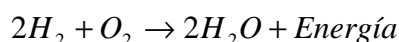
Figura 3. El ciclo del hidrógeno.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MOTOR DE HIDRÓGENO

Ventajas

a) Emisiones

Este es el punto fuerte de este motor, ya que, con él, se trata de solucionar los problemas actuales que presentan los combustibles derivados del petróleo, es decir, este tipo de motores contribuirán a mitigar los problemas de polución en las grandes ciudades, así como el más acuciante, el del cambio climático. Es bien sabido que la reacción en este motor es:



Ahora bien, al ser una reacción exotérmica se liberará calor, con lo que podrían aparecer dos problemas importantes, la detonación o combustión indeseada de la mezcla y la formación de óxidos de nitrógeno, los denominados NO_x. Éstos últimos serían generados a causa de la alta temperatura de combustión del hidrógeno, aunque en cantidades ínfimas comparadas con los motores actuales con catalizador incluido. Lo que sí se evitaría sería la generación de otros contaminantes, como los sulfuros, el ozono, los hidrocarburos no quemados, etc., los cuales son responsables en gran parte de la contaminación y de las enfermedades del sistema respiratorio causadas por la contaminación en grandes ciudades.

El problema del autoencendido será tratado más adelante de una forma más exhaustiva, ya que es uno de los aspectos del hidrógeno que más quebraderos de cabeza ha provocado.

b) Disponibilidad del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y, aquí en la Tierra, lo podemos encontrar formando parte del agua y de los hidrocarburos. Esto implica que el hidrógeno constituiría una fuente de energía sumamente diversificada, que acabaría con el problema expuesto en la introducción acerca de la dependencia de muchos países del petróleo producido por unos pocos países. Y, además, sería un recurso inagotable, ya que podría ser extraído del agua mediante electrólisis, como ya se apuntó, o bien gracias al tratamiento de otros compuestos que contengan hidrógeno, tales como el metanol, el amoníaco o las gasolinas. El ciclo se cerraría al volver a combinarse el oxígeno y el hidrógeno para dar agua, tal y como se expuso en la introducción.

c) Híbrido eléctrico-hidrógeno

Como ya se mencionó en la introducción, en los últimos años se han venido desarrollando otras tecnologías con el objetivo de sustituir al motor de combustión, una de las cuales es la célula de combustible. Dado que esta tecnología se emplea en la generación de energía eléctrica a partir del H₂, entonces será posible su inclusión en el tipo de automóviles que estamos tratando para cumplir la función de las baterías actuales. No obstante, las células de combustible presentan una ventaja frente a las baterías convencionales y es que es posible su empleo con el motor apagado. Algo que puede

resultar útil en climas calurosos en los que es usual dejar el motor en marcha para mantener el coche a una temperatura adecuada, tal y como ocurre, por ejemplo, en las regiones cálidas de los Estados Unidos.

d) Densidad

El hidrógeno es el elemento más pequeño que existe lo cual implica que su densidad en estado líquido, que vale 70 kg/m^3 , será menor que la de cualquier otra sustancia líquida conocida. Este hecho hace que el hidrógeno tenga una energía por unidad de masa 2,6 veces mayor que la de la gasolina, lo cual constituye una gran ventaja para el mismo. El problema es que para una cantidad dada de energía el hidrógeno requiere un volumen cuatro veces mayor que el correspondiente a la gasolina.

Inconvenientes

a) Autonomía y consumo

Debido al problema mencionado en el apartado anterior acerca de la densidad de masa y energía del hidrógeno, la autonomía de un vehículo impulsado gracias al hidrógeno no llega a ser todo lo grande que sería de esperar. Una parte del problema también es originado por el consumo del motor. En el BMW 750 hl el valor de dicha característica asciende a unos 350 km con un depósito criogénico. Aunque, con nuevos diseños de depósitos de esta clase o con los hidruros metálicos, se espera aumentar este parámetro del vehículo, a medida que vaya progresando la investigación en este aspecto.

b) Infraestructura

En la actualidad existen muy pocas estaciones en las que sea posible repostar hidrógeno de la forma adecuada a los distintos sistemas de almacenamiento que se barajan. Por ejemplo, en la actualidad el único lugar en el que se puede repostar hidrógeno líquido es el aeropuerto de Munich y únicamente permite repostar a los modelos 750 hl de BMW. Por parte de esta compañía se espera que en un futuro no muy lejano exista una cierta infraestructura que permita el manejo de forma confortable de vehículos a hidrógeno, es decir, que el repostar en cualquier lugar no constituya un problema. Para ello se busca el apoyo de las empresas del sector energético, tales como Shell por ejemplo, para desarrollar dicha infraestructura. El hecho de que, progresivamente, decaerá el interés en el petróleo por culpa de su seguro aumento de precio nos hace concebir esperanzas de que todos estos proyectos sean llevados a cabo.



Figura 4. Estación de repostaje de H_2 en el aeropuerto de Munich

c) Autoencendido

Tanto en motores alimentados con gasolina como en los que funcionan a base de hidrógeno el mecanismo por el cual se produce el autoencendido es el mismo. En cualquiera de los casos, los gases de entrada encuentran una fuente de calor con intensidad suficiente como para iniciar el proceso de combustión de la mezcla mientras la válvula de admisión se encuentra abierta. Las posibles fuentes de calor pueden ser una zona de alta temperatura de la cámara de combustión, como la bujía por ejemplo, algún defecto de la cámara de combustión, sustancias depositadas en la combustión anterior o incluso los gases de escape, los cuales todavía pueden conservar una temperatura suficiente como para producir la ignición de la mezcla entrante. Al emplear hidrógeno como combustible, el problema del autoencendido se agrava debido a dos causas principales. La primera es la baja energía que requiere la reacción de combustión para comenzar a darse, con lo que cualquier región de la cámara de combustión que esté medianamente caliente puede provocar fácilmente la reacción. La segunda es la alta velocidad de la llama, que influye en el rápido crecimiento del núcleo de la llama y la disminución del tiempo disponible para extinguirla.

Gracias a una serie de experimentos, se ha logrado eliminar algunas de estas posibles causas del autoencendido en motores de hidrógeno. En primer lugar, la posibilidad de que los gases de escape sean los responsables de este problema se desecha debido a que el tiempo durante el cual coexisten ambos tipos de gases no es lo suficientemente largo como para que se induzca la combustión. Por esto, se ha tratado de eliminar los puntos calientes de la cámara de combustión por medio de la refrigeración de las válvulas mediante sodio o la inclusión de bujías construidas con materiales con grandes coeficientes de conductividad térmica. También se han realizado experimentos con cámaras de combustión immaculadas y sin ningún tipo de irregularidad en su superficie. Pero ninguna de estas modificaciones ha permitido un control efectivo del autoencendido con lo que la investigación se ha encaminado hacia lo microscópico una vez eliminados los posibles factores macroscópicos. Se parte de una hipótesis, según la cual las partículas sólidas que quedan después de la combustión permanecen a temperaturas mayores que los gases circundantes al final de la carrera de escape, debido a su mayor capacidad calorífica y su mayor masa. Por lo tanto, un primer punto de vista consiste en reducir la temperatura de los gases de escape antes de introducir los de entrada de forma que estas fuentes puntuales de calor no consigan encender la mezcla entrante. Se podría pensar que un método efectivo consistiría en reducir la temperatura del líquido refrigerante del motor, pero esto no lograría las transferencias de calor necesarias para reducir lo suficiente la temperatura de los gases de escape. También se pueden aplicar técnicas de control de partículas para eliminar esas fuentes de calor puntuales, pero los resultados son satisfactorios sólo durante un breve intervalo de tiempo. La mejor solución consiste en reducir el volumen de la cámara de combustión sin cambiar de forma significativa la superficie de la misma. Supongamos que reducimos en un 30% el volumen de una determinada cámara de combustión sin cambiar significativamente el área de la superficie del cilindro, entonces los gases residuales serán enfriados un 30% más rápido que antes. Gracias a esto, además, hemos aumentado la relación de compresión en un 37,5%, lo cual implica, en un ciclo Otto, un aumento del rendimiento termodinámico del 5%. Así pues, se ahorra combustible y se consigue un descenso de la temperatura de los gases de escape mediante la reducción de las pérdidas de calor y la mejor conversión de la energía del combustible en trabajo, además de solucionar el problema del autoencendido.

CONFIGURACIÓN DE LOS MOTORES Y PRESTACIONES

De acuerdo con la información recabada, existen dos tipos básicos de motor de combustión que emplean hidrógeno como combustible. El primero y más importante es el motor de combustión de hidrógeno de cuatro tiempos, que es en esencia un motor típico de combustión interna, y el segundo se trata del motor Wankel.

Motor Wankel

Este tipo de motor rotativo parece dar buenos resultados al emplear hidrógeno como combustible, según lo atestiguan ensayos realizados con dinamómetro y una vez resueltos los problemas que presentaba en lo que a estanqueidad se refiere. Estos buenos resultados se deben a la configuración de este motor, el cual minimiza las dificultades de combustión que se dan en otros tipos de motores. El motor rotativo no suele dar problemas de autoencendido pues, tal y como se puede apreciar en la fotografía del motor, la cámara de combustión presenta una geometría adecuada para la combustión del hidrógeno, o sea, presenta una relación volumen/superficie muy elevada. De todos modos, suponiendo que los gases de escape fueran responsables del autoencendido, tampoco plantearían problemas en el motor Wankel ya que, cuando los gases frescos entran, la cámara ya se encuentra vacía y los gases de escape se encuentran lejos.

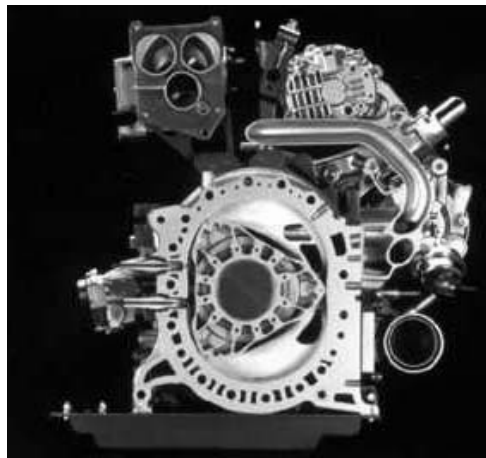


Figura 5. Motor Wankel de Mazda

En el motor Wankel es posible el aprovechamiento de la alta temperatura de ignición del hidrógeno. Se está investigando la posibilidad de incluir agua pulverizada en la mezcla de entrada, la cual se evapora al quemarse el hidrógeno llegando a ejercer presiones muy altas de forma elástica, a diferencia de lo que ocurre en el pistón, en el cual se da una detonación. Actualmente se está tratando de conseguir que la mayor parte de la potencia se deba a la acción del vapor de agua y no al hidrógeno.

Otra ventaja más de este motor radica en su relación potencia/peso, este motor desarrolla una alta potencia en comparación con su tamaño lo que permite tener un sistema motriz de alta potencia sin emisiones y de reducido tamaño. La compañía Reg Technologies ha conseguido una relación potencia/peso cerca de los 0,34 kg por caballo

de potencia, una cantidad ínfima comparada con los 2,72 kg/CV que presenta el motor de émbolo.

No obstante, el motor Wankel no está libre de defectos pues presenta un problema en lo que a lubricación se refiere. El aceite empleado en la lubricación de los sellos se encuentra en contacto con la mezcla de combustible y aire, con lo que, al producirse la combustión, no sólo se quemará el hidrógeno sino que además lo hará el aceite. En realidad este hecho constituye dos problemas, el primero es la desaparición del lubricante con lo que el consumo del mismo aumentará, mientras que el segundo afectará a las emisiones del motor. El aceite, al ser quemado, producirá CO₂ además de otros contaminantes como pueden ser los sulfuros, NO_x, etc. Lo cual ha provocado que los automóviles con motor rotativo no lleguen a ser considerados Z. E. V., es decir, de emisión cero. Además esta clase de motor no posee la característica de los motores de pistón de actuar como freno, comúnmente llamado freno motor. Otro problema, que aún hoy no ha sido resuelto del todo, es el denominado dieseling. El dieseling se produce a causa de la precisión del punto de combustión pues, en caso de retrasarse un poco, puede ocurrir que la combustión comience antes de que el rotor gire por sí mismo. En este caso, que se suele dar cuando la velocidad es baja, la explosión empuja al rotor en sentido contrario al ciclo de rotación y cabe esperar daños en el motor.

A pesar de todo, la compañía Mazda ha desarrollado varios modelos de coche que cuentan con este tipo de motor desde los años 70 y que, según la propia compañía, ofrecen unas prestaciones casi iguales que la de los motores de cuatro tiempos convencionales. No obstante, en la década de los 70 la tecnología no estaba lo suficientemente desarrollada como para que los motores Wankel fuesen equiparables a los de pistón. Durante estos años la compañía japonesa ha adaptado algunos modelos de forma que empleen hidrógeno como combustible. Dichos modelos son el HR-X1, HR-X2, y el MX-5, del cual detallamos una comparativa con sus equivalentes en gasolina y eléctrico:

	Gasolina	Hidrógeno	Eléctrico
Potencia (CV)	120	110	
Velocidad punta (km/h)	183	150	130
0-100 km/h (seg)	9.4	13.0	21.5
Tiempo de repostaje	3 min	15 min	horas

Donde se pueden observar que las diferencias existentes entre el modelo a gasolina y el que emplea hidrógeno no son tan grandes como las que hay entre el primero y el eléctrico. Por esto, y dadas las ventajas que presenta el hidrógeno como combustible, será bastante interesante su aplicación en automoción con esta clase de motor.

Motor de cuatro tiempos

El diseño de este motor es básicamente el mismo que el de un motor a gasolina, es decir, un motor que sigue el ciclo Otto, con sus pistones, válvulas y demás sistemas. Esta clase de motores permiten aprovechar las especiales características que presenta el hidrógeno como combustible, a saber:

- Alta velocidad de llama en flujo laminar.
- Alto número de octanos efectivo
- Ninguna toxicidad y no llega a formar ozono

Por esto, con un adecuado diseño podemos conseguir un motor con un rendimiento energético mayor que el equivalente en gasolina y totalmente ecológico. El alto número de octanos permite elevar la relación de compresión que redundará en un aumento del rendimiento energético, mientras que la alta velocidad de llama en flujo laminar contribuye a la reducción de las emisiones de NO_x , pues es posible emplear dosados muy bajos, tan bajos que han llegado al 0,2. Gracias a esta posibilidad se puede aumentar también el rendimiento. Con todo esto se han conseguido aumentos del rendimiento del 25-30% con respecto a los motores equivalentes en gasolina.



Figura 6. Motor de cuatro tiempos de BMW a hidrógeno

Las prestaciones de este nuevo motor son muy similares a las que vienen ofreciendo los motores que emplean hidrocarburos como combustible. En el siguiente cuadro se puede apreciar mejor para el caso de los modelos de BMW:

MOTOR	750 IL	750 HL
Combustible	Gasolina súper	H ₂
Cilindros	12	12
Válvulas/cilindro	2	2
Cilindrada (cm ³)	5379	5379
Potencia Máxima (cv/rpm)	243	204
RENDIMIENTO		
Velocidad máxima (km/h)	250	226
0-100 km/h (seg)	6,8	9,6
0-1000 m (seg)	26,7	26,1

Se puede apreciar que las prestaciones empeoran un poco con respecto al modelo de gasolina. La disminución de potencia se puede explicar gracias al poder calorífico de la mezcla que entra en el pistón. En el caso de un motor a gasolina:

$$L_i \approx 40 \text{ Mj/Kg}$$

$$PM \approx 168 \text{ gr/mol}$$

$$F = 1$$

$$PM_{\text{aire}} = 28,9 \text{ gr/mol}$$

Con estos datos el poder calorífico de la cilindrada resulta:

$$Q_c = L_i \cdot \frac{PM_{\text{gasolina}}}{22,4} \cdot \frac{F}{F + \frac{PM_{\text{gasolina}}}{PM_{\text{aire}}}} = 44 \text{ Kjul/l}$$

Mientras que para el hidrógeno:

$$L_i = 100 \text{ Mj/kg}$$

$$PM = 1 \text{ gr/mol}$$

$$F = 1$$

El valor del poder calorífico de la cilindrada en este segundo caso es:

$$Q_c = 7,6 \text{ Kjul/l}$$

Así pues, gracias a estos cálculos, podemos demostrar que la potencia ofrecida por un motor de gasolina será mayor que la del mismo motor en el caso de quemar hidrógeno, siempre y cuando el dosado sea el mismo para los dos casos. Ahora bien, la posibilidad de usar hidrógeno como combustible se hace interesante gracias a las cualidades del mismo, ya reseñadas al comienzo de la sección que nos ocupa.

Almacenamiento del hidrógeno

El gran inconveniente que presentó en un principio el hidrógeno como combustible fue su dificultad de almacenamiento y la violencia de la reacción con el oxígeno del aire cuando el hidrógeno se encuentra en fase gaseosa y con una concentración suficiente. El almacenamiento del hidrógeno puede llevarse a cabo de tres formas distintas, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

a) *Tanques criogénicos.*

Esta posibilidad es una de las que se barajan como opción de futuro a la hora de almacenar H_2 en su uso como combustible. El hidrógeno en fase líquida tiene una densidad lo suficientemente alta como para que, en un tanque de, aproximadamente, el mismo volumen que uno de gasolina actual, se pueda transportar el suficiente hidrógeno de forma que la autonomía no se resienta en exceso. Para conseguir que el hidrógeno se encuentre en forma líquida se requieren unas condiciones de temperatura extrema, que debe valer $253^\circ C$ bajo cero. Esto implica que el tanque debe estar sumamente aislado para evitar aumentos de la temperatura que provocarían la evaporación del combustible. Aún así, algo de calor terminará entrando en el depósito evaporando pequeñas cantidades de hidrógeno. Este gas deberá ser purgado de vez en cuando para evitar aumentos peligrosos de presión. Como hay que evitar que el hidrógeno reaccione con el oxígeno del aire, a la hora de purgar se le hace pasar por un catalizador que lo oxida sin peligro.

BMW ha apostado por esta forma de almacenamiento para sus 750 hl. El depósito consiste básicamente en dos capas de acero separadas por una cámara de vacío, donde existen además 70 capas de fibra de vidrio intercaladas con láminas de aluminio que actúan como aislante térmico. Además, el tanque posee un aislamiento exterior del depósito que actúa como una capa de 4 metros de grosor de estireno, siendo su espesor de sólo 3 centímetros. Todo este aislamiento consigue que el aumento de temperatura por día sea de $1^\circ C$, con lo cual se produce un aumento de la presión de 1 bar/día. Este hecho está también previsto con la inclusión de válvulas que se abren cuando la sobrepresión es de 4 bar, con lo cual se evitan posibles fallos debidos a las tensiones generadas. Por último, el asunto de las explosiones sería causado en coches con motor convencional por la reacción del oxígeno del aire y la gasolina en el interior del depósito, pero, en este caso, al no existir aire en el interior, queda descartada esta posibilidad. Hay que excluir también la posibilidad de entrada de aire en el tanque a causa de la mayor presión a que se encuentra sometido el hidrógeno. Cabe, sin embargo, preguntarse acerca del comportamiento en caso de accidente grave, bajo las condiciones más severas, es decir, fuego, deformación o perforación del tanque. Pues bien, gracias a una válvula de seguridad y a un cuidado diseño, que asegura la rotura por un lugar determinado, se consigue un único resultado, que la desintegración del depósito no sea posible. En la figura 6 podemos ver uno de estos depósitos.



Figura 7. Depósito de combustible del nuevo Mini Cooper

De todos modos, este tipo de almacenamiento presenta graves inconvenientes. El principal reside en el precio de los mismos, ya que involucran alta tecnología de aislamiento. No hace mucho, el precio de uno de estos tanques rondaba los 1200\$ suponiendo producción masiva, no obstante, nuevos prototipos resultan ciertamente más asequibles pues su precio es de unos 500\$ ó 700\$. Por otro lado, atendiendo a la energía necesaria para la licuefacción del hidrógeno, podemos ver que desde un 30% a un 49% del hidrógeno debería ser empleado en la producción de la mencionada energía. A causa de esto, el coste del hidrógeno se hace entre un 30% o un 40% más caro que el gas.

b) *Hidruros metálicos.*

Este es otro de los sistemas que puján fuerte por ser el futuro modo de almacenar hidrógeno. Existen ciertos metales que son, digámoslo así, hidrogenófilos, es decir, que presentan una 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 desorción del hidrógeno contenido en el metal. Ni que decir tiene que este proceso es totalmente reversible, de forma que se pueda rellenar el depósito tantas veces como sea necesario. La principal ventaja de los metales como contenedores de hidrógeno se encuentra en el hecho de que se pueden conseguir densidades de hidrógeno dentro del metal mayores que la del hidrógeno líquido, o sea, que para un volumen dado tendremos más hidrógeno en forma de hidruro que en fase líquida. Otra ventaja de esta forma de almacenar hidrógeno es su seguridad ya que son más seguros que un depósito convencional de gasolina. Por el contrario, el mayor problema que presentan los hidruros metálicos como sistema de almacenamiento es su elevado peso que provocará una reducción de la relación potencia/peso del automóvil. Este problema surge al emplear aleaciones de hierro y titanio, y se podría solucionar con aleaciones de magnesio y níquel, más ligeras pero que requieren una mayor temperatura para liberar el hidrógeno. Otra desventaja de los hidruros la encontramos a la hora de repostar, ya que el tiempo que tarda un depósito de este tipo en rellenarse es de unos 15 minutos, cuando el tiempo al que estamos acostumbrados resulta ser de unos 3 minutos. Desde los años 70 se han construido varios prototipos de coche que cuentan con este tipo de sistema de almacenamiento y el resultado ha sido bastante satisfactorio, aunque todavía queda

mucho camino por recorrer en este sentido. Por esto, se investiga en nuevas aleaciones que desempeñen un mejor papel. En la figura 7 podemos observar un tanque de hidrógeno de este tipo.

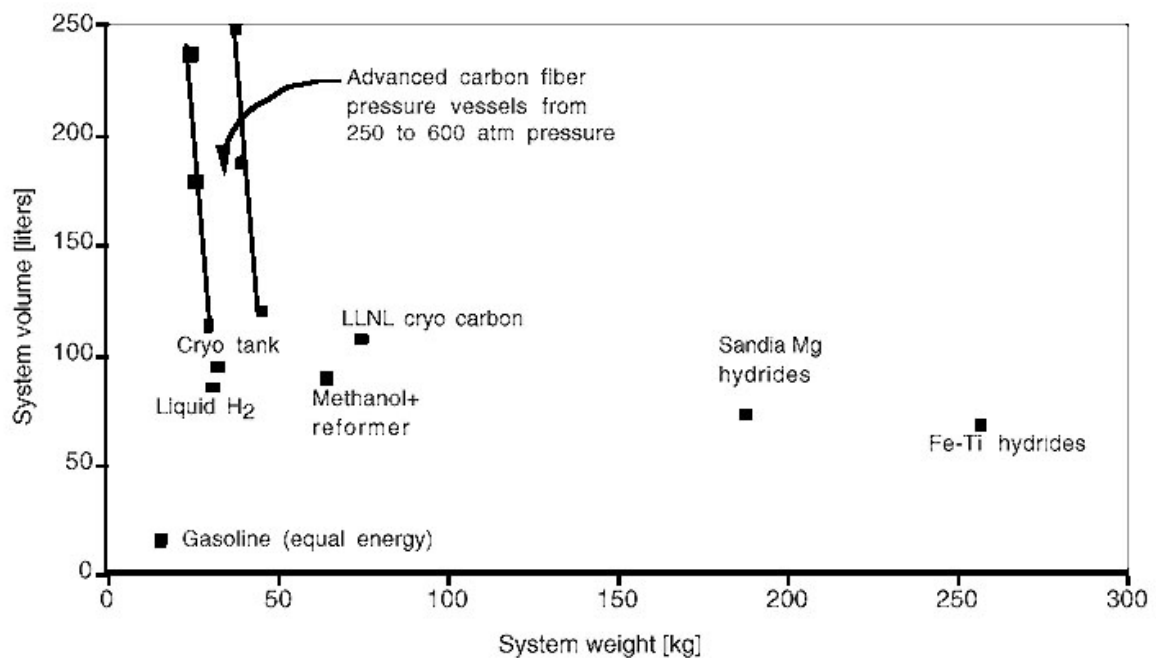


Figura 8. Tanque metálico para almacenar H₂

c) *Tanques de gas.*

Este es el peor de los tres sistemas de almacenamiento ya que requiere un volumen que no se encuentra disponible en un vehículo. Consiste en almacenar el gas a elevadas presiones si queremos que dicho depósito contenga bastante hidrógeno. Estas presiones requieren materiales muy resistentes que, generalmente, también serán muy pesados.

En la siguiente gráfica se puede ver la relación entre el peso y la capacidad de los distintos sistemas de almacenamiento:



Inyección

Otro punto importante de la configuración del motor es la inyección. Ésta se puede realizar de dos maneras, bien inyectando el hidrógeno a temperatura ambiente o bien criogenizado. El BMW 750 hl presenta el primero de estos sistemas mientras que el nuevo Mini posee el segundo sistema. Éste último tiene la ventaja que al entrar el combustible a una temperatura extremadamente baja se potencia el llenado del cilindro lo que se traduce en un aumento de potencia y rendimiento del motor que llegará a equipararlo a los actuales motores de combustión de gasolina. Algo que es probable que ocurra en los primeros modelos de motores alimentados con hidrógeno es que incluyan un sistema doble de inyección, uno para la gasolina y otro para el hidrógeno. Esta dualidad se hace necesaria en tanto no se hayan solucionado los problemas de autonomía y de infraestructura de repostaje de los vehículos que nos ocupan.

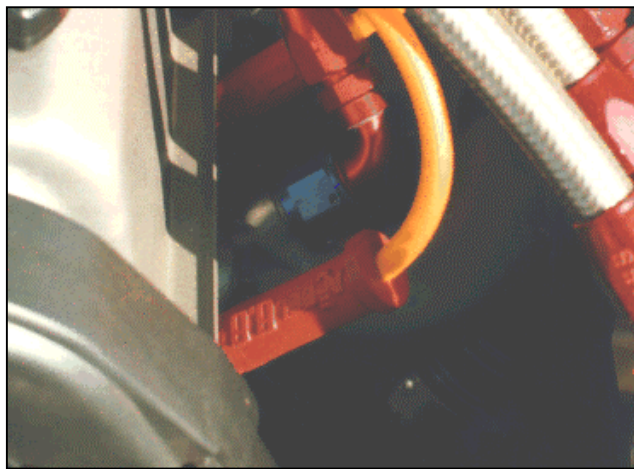


Figura 9. Inyección en un motor de hidrógeno

No obstante, no todo son ventajas, pues los ingenieros de Ford afirman que existen algunas dificultades en el sistema de inyección. Estos problemas se deben a que el hidrógeno es un gas muy seco que provoca un desgaste excesivo de las partes móviles del sistema de inyección. En los motores alimentados con gasolina no se da este tipo de problemas, ya que la propia gasolina actúa como lubricante de las mencionadas piezas del sistema de inyección. Es de suponer que estos problemas ya han sido resueltos pues, en caso contrario, no existirían proyectos inminentes de comercialización de coches a hidrógeno.

BIBLIOGRAFÍA

- Página web del Lawrence Livermore National Laboratory
<http://en-env.llnl.gov>
- Información e imágenes acerca del motor Wankel:
<http://www.monito.com/wankel/hydrogen.html>
- Página web de la International Academy of Science
<http://www.science.edu>
- Página web de BMW
<http://www.bmw.com>
- BMW Magazine
- Página web del College of Engineering-Center for Environmental Research and Technology
<http://www.cert.ucr.edu>

Figuras:

Fig. 1 .- Extraída de la página web de la Asociación Alemana del Hidrógeno
<http://www.dwv-info.de>

Fig. 2 .- Extraída de la página web de la C.N.N.
<http://www.cnn.com>

Fig. 4, 6 y 7 .- Extraídas de la página oficial de BMW

Fig. 8 .- Extraída de la página web <http://www.fuelcellstore.com>

Fig. 9 .- Extraída de la página web del College of Engineering-Center for Environmental Research and Technology