

## **2.5 Comparación entre las distintas alternativas**

### **2.5.1 Introducción**

En este apartado se compararán algunas de las propiedades más importantes que debe tener un combustible enfocado a un sistema energético basado en él. Idealmente, el combustible seleccionado debería ser inagotable, tener una alta eficiencia en su utilización, ser de utilización segura, ser apropiado para el transporte, ser respetuoso con el medioambiente y ser viable económicamente.

### **2.5.2 Inagotabilidad**

Sólo los recursos renovables son inagotables. Las reservas de carbón son abundantes pero no ilimitadas, por lo tanto un sistema energético basado, por ejemplo, en la gasificación del carbón para la obtención de combustibles no podría ser en ningún caso indefinido.

Un sistema energético basado completamente en energías y recursos renovables sí podría ser un sistema energético permanente. Este es el caso de un sistema basado en el hidrógeno producido a partir de energías primarias renovables.

### **2.5.3 Eficiencia**

La eficiencia energética incluye no sólo consumir la menor energía teórica posible sino también, utilizarla del modo más apropiado. Al comparar los combustibles, es importante tener en cuenta las eficiencias en el uso final. Durante la utilización por los consumidores, los combustibles se transforman en varias formas de energía, mecánica, eléctrica y térmica. Algunos estudios muestran que casi todas las formas de utilización, el hidrógeno puede convertirse en la forma de energía deseada más eficientemente que otros combustibles.<sup>34</sup>

En la siguiente tabla, se muestran los factores de eficiencia de utilización, definidos como la eficiencia de utilización del combustible dividido entre la eficiencia de utilización del hidrógeno en diferentes aplicaciones. Se puede observar que el hidrógeno es el combustible con mayor eficiencia.

---

<sup>34</sup> T. N. Veziroglu and F. Barbir. *Hidrogen: The Wonder Fuel*. International Journal of Hydrogen Energy 17, 391 (1992).

**Tabla 7 – Factores de Eficiencia de utilización para distintas Aplicaciones**

<b>Aplicación</b>		<b>Factor de Eficiencia de utilización</b> $\Phi_u = \eta_f/\eta_h$
<u>Energía Térmica</u>	<i>Combustión con llama</i>	1.00
	<i>Combustión Catalítica</i>	0.80
	<i>Generación de Vapor</i>	0.80
<i>Energía Eléctrica: Células de Combustible</i>		0.54
<i>Transporte de Superficie</i>	<i>Motores de Combustión Interna</i>	0.82
	<i>Células de Combustible /Motor Eléctrico</i>	0.40
<i>Transporte a Reacción Subsónico</i>		0.84
<i>Transporte a Reacción Supersónico</i>		0.72
<i>Factor de Eficiencia de Utilización del Hidrógeno</i>		1.00
<i>Factor de Eficiencia de Utilización de los Combustibles fósiles</i>		0.72

$\eta_f$ : eficiencia de los combustibles fósil;  $\eta_h$ : eficiencia del hidrógeno.

Fuente: T. Nejat Veziroglu. *Hydrogen Energy System: A permanent Solution to Global Problems*

### *Eficiencia en los motores de combustión interna y las turbinas*

El hidrógeno es un buen combustible para los motores de combustión interna. Los motores de combustión interna al utilizar hidrógeno son en torno a un 20% más eficientes que los motores de gasolina.<sup>35</sup> La eficiencia térmica ideal de un motor de combustión interna es:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{k-1}$$

donde:

r = ratio de compresión

k = ratio de los calores específicos ( $C_p/C_v$ )

La ecuación muestra que la eficiencia térmica se puede mejorar aumentando bien el ratio de compresión bien el ratio de calores específicos. Los motores de hidrógeno tienen ambos ratios superiores que los motores de gasolina debido a la baja

<sup>35</sup> J.N. Norbeck, J. W. Heffel, T.D. Durbin, B. Tabbara, J.M. Bowden y M.C. Montano. *Hydrigen Fuel for Surface Transportation*. SAE, Warrendale, PA, 1996.

temperatura de autoignición del hidrógeno y a la capacidad para quemarse en mezclas pobres. Sin embargo, el uso del hidrógeno en motores de combustión interna da como resultado una pérdida potencia debido a la menor energía contenida en la mezcla estequiométrica en el cilindro del motor. Una mezcla estequiométrica de gasolina y aire y de hidrógeno gaseoso y aire premezclado externamente ocupa en torno a un 2% y un 30% del volumen del cilindro respectivamente. Bajo estas condiciones, la energía de la mezcla de hidrógeno es solo el 85% de la la mezcla de hidrógeno, de este modo se obtiene como resultado una reducción de en torno al 15% en potencia. Por lo tanto, el mismo motor utilizando hidrógeno dará una potencia un 15% inferior que cuando utiliza gasolina. La potencia suministrada por los motores de hidrógeno se puede mejorar usando las técnicas avanzadas de inyección de combustible o hidrógeno líquido. Por ejemplo, si el hidrógeno líquido es premezclado con aire, la cantidad de hidrógeno que puede ser introducido en un cilindro de combustión puede ser aumentada aproximadamente en un tercio.<sup>36</sup>

#### **2.5.4 Seguridad**

La gasolina y el diesel son combustibles relativamente seguros porque la gente ha aprendido a utilizarlos de forma segura. No son biodegradables, por lo tanto las posibles pérdidas contaminarían el suelo y el agua.

El biodiesel es más biodegradable que el diesel convencional. Puede ser transportado, distribuido y almacenado utilizando la misma infraestructura que el diesel convencional.

Tanto el etanol como el metanol puede formar vapores explosivos en los tanques de combustible. Sin embargo, en los accidentes el etanol y el metanol son menos peligrosos que la gasolina porque su baja velocidad de evaporación mantiene la concentración de alcohol en aire baja y no explosiva.

El hidrógeno a pesar de sus propiedades de riesgo, tiene un record en seguridad industrial; y para vehículos de consumo, se están desarrollando códigos y estándares. El hidrógeno y sus principales productos de la combustión no son tóxicos a excepción de los NOx que se pueden producir en la combustión con llama. El tema del manejo seguro del hidrógeno se trata con más profundidad en el apartado 4.1.

---

<sup>36</sup> J.N. Norbeck, J. W. Heffel, T.D. Durbin, B. Tabbara, J.M. Bowden y M.C. Montano. *Hydrigen Fuel for Surface Transportation*. SAE, Warrendale, PA, 1996.

### 2.5.5 Combustible para el transporte

En el sector del transporte es muy importante considerar la energía por unidad de masa y de volumen que tiene el combustible. El combustible debería ser lo más ligero posible, es decir, que posea la mayor energía por unidad de masa. En este sentido el hidrógeno es el más ligero. La energía por unidad de volumen debería ser lo mayor posible. Al considerar los volúmenes la gasolina es el mejor, mientras que el hidrógeno es el peor entre los combustibles líquidos. Estas propiedades afectan en el transporte porque el peso debe ser el menor posible porque la aceleración es proporcional a la masa. Del mismo modo, el volumen debe ser lo menor posible ya que la fuerza de rozamiento viscoso es proporcional al área transversal al movimiento. Estos dos hechos se pueden combinar en un número adimensional denominado “Factor de movilidad”<sup>37</sup>. El área transversal es proporcional al volumen elevado a dos tercios. El sector del transporte debe de transportar el combustible a la vez que lo va consumiendo. La distancia en la que es necesario el repostaje debería ser lo mayor posible. De modo que es conveniente que el combustible sea lo más ligero posible y que además ocupe el menor espacio posible. El factor de movilidad,  $\Phi_m$ , combina estos dos requerimientos en un número adimensional:

$$\phi_m = \frac{\left(\frac{E}{M}\right)\left(\frac{E}{V}\right)^{2/3}}{\left(\frac{E_h}{M}\right)\left(\frac{E_h}{V_h}\right)^{2/3}}$$

Donde  $E$  es la energía generada por el combustible,  $M$  es la masa del combustible,  $V$  es el volumen del combustible, y el subíndice  $h$  se refiere al hidrógeno. Cuanto mayor sea el factor de movilidad, mejor es el combustible para el sector del transporte.

A continuación se presenta una tabla en la que se evalúa el factor de movilidad de distintos combustibles:

---

<sup>37</sup> T.N. Verzuroglu. “Hydrogen Technology for Energy Needs of Human Settlements”. Int. J. Hydrogen Energy 12 (2) (1987).

**Tabla 8 – Comparación del Factor de Movilidad para distintos combustibles**

Combustible		Fórmula química	Energía por unidad de masa (J/kg)	Energía por unidad de volumen (J/m <sup>3</sup> )	Factor de movilidad $\Phi_m$
Combustibles líquidos	Gasolina	$C_{5-10} H_{12-22}$	47.4	34.85	0.76
	Metanol	$CH_3OH$	22.3	18.10	0.23
	Etanol	$CH_3 CH_2OH$	29.9	23.60	0.37
	Hidrógeno Líquido	$H_2$	141.9	10.10	1.00
Combustibles gaseosos	Gas Natural	$CH_4$	50.0	0.040	0.75
	Hidrógeno Gaseoso	$H_2$	141.9	0.013	1.00

Fuente: T. Nejat Veziroglu. *Hydrogen Energy System: A permanent Solution to Global Problems*

Entre todos los combustibles, líquidos y sólidos, el hidrógeno tiene el mejor factor de movilidad, mientras que el metanol tiene el más bajo. Esta es una de las razones por las que el hidrógeno es el combustible escogido en el programa espacial, a pesar de que actualmente es más costoso que otros combustibles.

### 2.5.6 Impacto ambiental

Estudiaremos las emisiones en la combustión del combustible.

Los gases que salen por el tubo de escape en los motores de gasolina son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono (CO), que es un gas letal, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas. Sin embargo los vehículos de gasolina están reduciendo rápidamente sus emisiones. En los motores diesel, a las emisiones anteriores hay que sumar el dióxido de azufre y los aerosoles de sulfato. Al igual que anteriormente los vehículos diesel están reduciendo rápidamente sus emisiones. Utilizando biodiesel en lugar de diesel se reducen la emisión de monóxido de carbono, de dióxido de azufre y de partículas, pero aumentan las emisiones de NOx. Los vehículos de gas natural pueden demostrar una reducción en de las emisiones de CO y NOx comparado con los combustibles convencionales. Sin embargo, las emisiones de hidrocarburos inquemados podrían aumentar. En la combustión de etanol E85 se pueden demostrar una reducción del 25% en las emisiones formadoras de ozono (CO y NOx) comparadas con la gasolina. Y en las de metanol M85 una reducción del

40% comparados con la gasolina. Los vehículos eléctricos tienen emisiones nulas en el escape, sin embargo las emisiones deben ser contabilizadas en su producción. Estas dependerán de la fuente o fuentes utilizada para su generación. Y finalmente en el caso del uso del hidrógeno se observa que los motores de combustión interna al utilizar hidrógeno emiten muchos menos contaminantes que al utilizar gasolina. Básicamente las únicas emisiones son de vapor de agua y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno\*. El hidrógeno tiene un amplio rango de inflamabilidad en aire (del 5 al 75%) y por lo tanto el exceso de aire puede utilizarse de forma más eficiente. La formación de óxidos de nitrógeno en la combustión hidrógeno-aire se puede minimizar con el exceso de aire y disminuyendo la temperatura de la atmósfera de combustión, usando tecnologías como la inyección de agua, recirculación de los gases de escape, o usando hidrógeno líquido. Las emisiones de NOx en los motores de hidrógeno son un orden de magnitud inferior que las de los motores de gasolina. Los únicos contaminantes resultantes del uso del hidrógeno en turbinas y motores de reacción son los óxidos de nitrógeno.

### **2.5.7 Viabilidad económica**

El problema que nos planteamos es principalmente fabricar un combustible que luego va a ser utilizado de diferentes formas. En todas las transformaciones de energía se produce una pérdida de energía, este caso no es una excepción. Lo que quiere decir que la energía que se necesita para fabricar el combustible (cualquiera que sea, hidrógeno, metanol, etanol, biodiesel o los productos de la gasificación del carbón) va a ser superior que la energía que vamos a obtener al utilizar dicho combustible. Cuanto menor sea esta energía dependerá de las eficiencias de cada transformación. Por esto no tiene mucho sentido utilizar un combustible fósil para fabricar otro combustible que se va a utilizar en un proceso en el que el combustible fósil original podría haber sido utilizado. La única forma de que el proceso sea rentable económicamente, es que la energía aportada sea “gratuita” este sería el caso de las energías renovables. Sin embargo hoy en día resulta más barato producir por ejemplo hidrógeno a partir del gas natural que a partir de cualquier energía primaria renovable. Sin embargo, este hidrógeno fabricado no debería utilizarse en procesos en los que se pudiera utilizar el gas natural, porque entonces se estaría desperdiciando energía.

Actualmente los el biodiesel, como sustituto del diesel, y el bioetanol, como sustituto de la gasolina, están teniendo un gran impulso en el mercado. Este hecho se

---

\* Nota: Se han detectado pequeñas cantidades de hidrocarburos inquemados, CO<sub>2</sub> y CO debidas al aceite de lubricación.

debe fundamentalmente a que al utilizar biodiesel o bioetanol la mayor parte de la tecnología del proceso permanece inalterada. Y esto resulta mucho más conveniente económicamente a corto plazo.

Las tecnologías relacionadas con el hidrógeno se están desarrollando rápidamente y del mismo modo se están reduciendo los precios. Este hecho unido a la subida de precios de los combustibles fósiles hace que se convierta en una alternativa cada vez más interesante desde el punto de vista económico.

### 2.5.8 Versatilidad

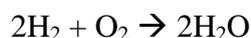
En el uso final, el combustible tiene que transformarse, a través de un proceso, como podría ser la combustión, en otra forma de energía (energía térmica, energía mecánica y electricidad). Si un combustible puede ser transformado a través de más de un proceso en diferentes formas de energía, se convierte en más versátil y conveniente su utilización. La siguiente tabla refleja diferentes procesos de conversión y la posibilidad o no de su utilización con los distintos combustibles.

**Tabla 9 – Posibilidad de utilización de distintos procesos de conversión.**

<i>Proceso de conversión</i>	<i>Etanol</i>	<i>Biodiesel</i>	<i>Metanol</i>	<i>Hidrógeno</i>
<i>Combustión con llama</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Producción directa de vapor</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>
<i>Combustión catalítica</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>
<i>Conversión química</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>
<i>Conversión electroquímica</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>

A nivel de usuario la conversión de los combustibles fósiles en otra forma de energía se realiza únicamente quemándolos mediante una combustión con llama. El hidrógeno además de la llama de combustión se puede convertir en otras formas de energía útil a través de otros procesos.

Producción directa de vapor en la combustión hidrógeno-oxígeno. Es el resultado de quemar hidrógeno con oxígeno puro es vapor puro, es decir:



Esta reacción genera temperaturas de llama de hasta 3000°C, por lo tanto, es necesaria la adicción de agua para regular la temperatura del vapor. Se puede producir tanto vapor saturado como sobrecalentado.

Combustión catalítica del hidrógeno. El hidrógeno en presencia de un catalizador apropiado puede ser combinado a temperaturas significativamente más bajas que la llama de combustión. Este principio puede ser utilizado para el diseño de quemadores y calentadores catalíticos. Los quemadores catalíticos necesitan más superficie que un quemador convencional de llama.

Conversión química. El hidrógeno se puede convertir en calor a través de reacciones químicas.

Generación electroquímica de electricidad (pilas de combustible). El hidrógeno puede ser combinado con el oxígeno en una reacción electroquímica, sin combustión, la inversa a la electrolisis, y producir corriente continua. El dispositivo en el que se lleva a cabo dicha reacción se denomina pila o célula de combustible. Dependiendo del electrolito utilizado existen varios tipos de células de combustibles.

### **2.5.9 Otras consideraciones**

#### *Problemas de mantenimiento*

En el biodiesel, las mangueras y los cierres puede deteriorarse con las mezclas de biodiesel muy concentradas. La lubricidad es mejor que en el combustible diesel convencional.

El etanol y el metanol necesitan lubricantes especiales. La práctica es muy similar si no idéntica, que las operaciones de abastecimiento de los combustibles convencionales.

Las pilas de combustible que trabajan con hidrógeno tienen un mantenimiento mínimo. El hidrógeno utilizado en las turbinas y en los motores de reacción es similar al uso de los combustibles convencionales de reacción. El uso del hidrógeno evita los problemas de sedimentación y corrosión, lo que alarga la vida y reduce el mantenimiento.

### **2.5.10 Conclusiones**

---

- De los combustibles en estudio el hidrógeno, metanol, etanol y biodiesel son en principio inagotables, porque todos ellos se pueden producir a partir de recursos renovables. Al contrario de lo que ocurre con los derivados de combustibles fósiles.
- Los combustibles alternativos, a excepción del hidrógeno, no son más inseguros que los combustibles convencionales. Los combustibles alternativos presentan una visión energética más segura que los tradicionales.
- Considerando como apropiado el factor de movilidad, el hidrógeno es el combustible más apropiado para el transporte.
- De entre los combustibles mencionados los vehículos de hidrógeno accionados por pila de combustible es el único que tendría emisiones reguladas nulas. Si bien hemos de tener en cuenta que según qué métodos de producción de hidrógeno, las emisiones globales del sistema lo serían o no.
- El hidrógeno además de la combustión por llama, para transformarse en una energía útil tiene los siguientes procesos: producción directa de hidrógeno, combustión catalítica, conversión química y conversión electroquímica.

El hidrógeno como combustible tiene que ser considerado en el marco de un sistema completo de energía. Las tecnologías de utilización del hidrógeno tienen que ir acompañadas de tecnologías igualmente viables para la producción, almacenamiento, transporte y distribución. La consideración de la tecnología energética del hidrógeno fuera del contexto de un sistema energético del hidrógeno completo, crea una visión incompleta. Generalmente es posible encontrar tecnologías que pueden ser mejores, o más económicas, o más eficientes, o más conveniente, pero no hay otro sistema energético, al menos con las tecnologías que se conocen hasta el momento, que se pueda comparar a los beneficios que ofrece el sistema energético del hidrógeno.<sup>38</sup>

El sistema energético del hidrógeno es un sistema coherente, comprensivo y una solución global a los problemas de energéticos-económicos y medioambientales. Las tecnologías del hidrógeno son especialmente interesantes en los países en vías de desarrollo que no tienen grandes infraestructuras energéticas. Porque aunque al principio esta tecnología puede resultar más costosa, a largo plazo son más beneficiosas tanto para la economía como para el medio ambiente.

---

<sup>38</sup> Prof. F. Barbir, Editor in Charge, International Journal of Hydrogen Energy. Universidad de Conéctica. USA.