

EL HIDRÓGENO: Una alternativa real a los combustibles fósiles y a los biocombustibles para automoción en España



Fernando Hernández-Sobrino *

Carlos Rodríguez-Monroy *

José Luis Hernández-Pérez **

Ingeniero Industrial

Doctor Ingeniero Industrial

Doctor en Ciencias Químicas

* ETSII. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID,
c/ José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid - Tfno: +34 913 363060 -
sobrinof@gmail.com; crmonroy@etsii.upm.es

** UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, Patio de Escuelas Mayores, 1 - 37008 Salamanca.
Tfno: +34 923 294400 - joseluisfernandezperez@gmail.com

Recibido: 18/12/09 • Aceptado: 12/04/2010

HYDROGEN: A real alternative to fossil fuels and biofuels in the Spanish vehicle industry

ABSTRACT

- For several years, UE has been trying to increase the use of biofuels to replace petrol or diesel in the transports with the aim of fulfilling a commitment about climate change, supplying environmentally friendly conditions, promoting renewable energy sources. To achieve this, the 2003/30/EC Directive states that in all the European countries, before 31st December 2010, at least 5.75% of all petrol and diesel fuels used for transport are biofuels. In previous papers, the authors evaluated this possibility. Analyzing hydrogen as replacement of fossil fuels and biofuels nowadays in Spain on a technical, economic and environmental point of view is the aim of this paper.
- **Key words:** hydrogen, biofuel, renewable energy, fuel cell, automotive.

RESUMEN

La Unión Europea busca fomentar, desde hace ya algunos años, el uso de biocarburantes como sustitutos del gasóleo o de la gasolina a efectos de transporte con los objetivos de cumplir los compromisos asumidos en materia de cambio climático, seguridad de abastecimiento en condiciones ecológicamente racionales y promoción de las fuentes de energía renovables.

Para conseguir estos objetivos, la Directiva 2003/30/EC establece que antes del fin del 2010 se debe consumir un mínimo del 5,75% de biocarburantes en toda gasolina y gasóleo comercializado con fines de transporte. En artículos anteriores, los autores evaluaron esta iniciativa desde los aspectos técnicos, económicos y medioambientales. En este artículo se expone la posibilidad de uso de hidrógeno como alternativa a los combustibles de origen fósil y a los biocombustibles desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental en España.

Palabras clave: hidrógeno, biocombustible, energías renovables, pila de combustible, automoción.

1. INTRODUCCIÓN

En artículos previos elaborados por los autores (Hernández et al, 2009, F.H. Sobrino et al 2009), se expusieron las razones que han llevado a la Unión Europea a fomentar el uso de biocombustibles. En dichos artículos se analizaron las ventajas potenciales del uso de biocombustibles (reducción de la dependencia energética del exterior, estabilización del precio de los combustibles fósiles, reducción de gases de efecto invernadero y fuente adicional del ingresos para el sector primario).

Se realizó así un análisis crítico al uso de los biocombustibles, así como de las medidas que se han puesto en marcha para incentivar su uso como la Directiva Europea 2003/30/EC y las ventajas fiscales que se les han dado, evaluando de forma empírica si las ventajas potenciales de los mismos realmente se llegan a conseguir.

El presente artículo analiza si es posible emplear, desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental, el hidrógeno como combustible alternativo a los combustibles fósiles y a los biocombustibles, teniendo en cuenta

además que el hidrógeno, salvo que se genere a partir de biomasa, no se considera biocombustibles según la orden ITC/2877/2008, del 9 de octubre y, por lo tanto, no cuenta con los beneficios fiscales que tienen éstos.

2. POSIBILIDADES DE USO DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA AUTOMOCIÓN

El hidrógeno se puede emplear en automoción de dos formas distintas:

- 1) Como *combustible de un motor de combustión interna alternativo* (M.C.I.): en este caso se comporta igual que un combustible fósil y su rendimiento máximo sobre el poder calorífico inferior (P.C.I.) es, aproximadamente, un 25% más eficiente que usar gasolina o gasoil (Amadeo N et al, 2004). Conociendo que un M.C.I. de ciclo Otto tiene un rendimiento de entre el 25% y el 30% en su punto óptimo (Muñoz M.; Payri, F, 1989) se puede estimar que un M.C.I., funcionando con hidrógeno, puede alcanzar un rendimiento aproximado de entre el 31% y el 37% (rendimiento medido como el cociente entre la energía mecánica a la salida del eje del motor y la energía entregada por el combustible medida sobre el P.C.I.).
- 2) Como *combustible de una pila de combustible*: en este caso el rendimiento, si se trata de una pila del tipo alcalina, está en torno al 60% (Tecnociencia 2005) sobre el P.C.I. (rendimiento medido como el cociente entre la energía entregada por el eje del motor eléctrico que es alimentado por la pila de combustible y la energía entregada por el combustible que alimenta la pila medida sobre el P.C.I.) con la ventaja añadida de que, si el vehículo no precisa energía, no se produce apenas consumo de hidrógeno, mientras que, en el caso de un M.C.I., sí se produce, siendo en este caso el rendimiento igual a cero.

Así pues, se puede estimar que el rendimiento de una pila de combustible de hidrógeno es aproximadamente el doble que el rendimiento de un M.C.I. que utilice este combustible (≈60% frente a ≈31-37%).

3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL USO DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA AUTOMOCIÓN FRENTE AL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES Y BIOCOMBUSTIBLES DE ORIGEN VEGETAL

El hidrógeno presenta las siguientes características que se pueden considerar ventajosas en su uso en automoción:

- Se trata de un elemento de elevado P.C.I. por unidad de masa, lo que permite un peso pequeño del combustible en los recipientes de almacenamiento. De hecho es, por

unidad de masa, tres veces más ligero que la gasolina o el gasoil (Martín et al, 2004).

- Se puede producir a partir de distintas materias primas: aguas, gas natural, etc. (Barry D. et al, 2000, Amadeo N et al, 2004).
- Su combustión es muy “limpia”, ya que la reacción del hidrógeno con oxígeno sólo produce agua, aunque con determinadas relaciones hidrógeno-aire se producen óxidos de nitrógeno (NO_x) (Martín et al, 2004, Amadeo N et al, 2004). Además, si el hidrógeno se obtiene mediante electrolisis, se elimina el impacto medioambiental provocado por la extracción de petróleo (Tecnociencia 2005).
- Se puede emplear en pilas de combustible y en M.C.I.; además, en el caso de aplicarse en pilas de combustible:
 - El rendimiento energético es mayor: obtener energía eléctrica en una pila de combustible a partir de hidrógeno y utilizar esa energía para alimentar un motor eléctrico es más eficiente que quemar ese mismo combustible en un M.C.I., ya que se puede alcanzar un rendimiento de entre 40% y 90% (Tecnociencia 2005). Esto es así porque un M.C.I. funciona según un *Ciclo de Carnot* de tal forma que el combustible se emplea para generar calor para que parte del mismo se convierta en energía mecánica, por lo que el rendimiento está limitado por el uso de dicho ciclo, lo que provoca una sensible minoración de la eficiencia (entre un 25% y un 30%). Las pilas de combustible no funcionan según un Ciclo de Carnot, ya que convierten la energía química en electricidad de forma directa, por lo que los vehículos están sujetos únicamente a las limitaciones del aprovechamiento de la energía generada por la pila de combustible, por el motor eléctrico, por la transmisión y las limitaciones relativas a los materiales empleados en la construcción de los diferentes elementos.
 - Son de funcionamiento silencioso: se estima que el nivel de ruido de una pila de combustible de tamaño medio a 30 metros es de 55 decibelios (Tecnociencia 2005); obviamente el resto del vehículo tiene partes móviles que generan ruido, pero es mucho menor en el caso de un vehículo con M.C.I. A título de ejemplo, los coches híbridos, cuando circulan en ciudad como eléctricos, son más difíciles de detectar por parte de los peatones, lo que en ocasiones provocan incluso problemas de seguridad.
 - Permite bajas temperaturas y presiones de trabajo: las pilas de combustible operan entre 80°C y 1000°C (Tecnociencia 2005). La temperatura dentro de un M.C.I. pueden alcanzar más de 2.300° C (Muñoz M.; Payri, F, 1989).
 - Mayor simplicidad: las pilas de combustible carecen de partes móviles, lo que permite un diseño más simple, una mayor fiabilidad y operatividad, y, por lo tanto, son menos propensas a las averías (Tecnociencia 2005).
 - Permite una disponibilidad de la energía similar a la de un vehículo con motor M.C.I. y muy superior a

la de un vehículo eléctrico con baterías recargables: para incrementar la potencia de salida de una pila de combustible basta con introducir más cantidad de hidrógeno y no se agota, mientras haya combustible disponible. Esto es similar para el caso de un M.C.I. con la salvedad que éste consume combustible en ciertos momentos en que no se precisa, como por ejemplo cuando un vehículo está al ralentí (Arias Paz, 2006).

- Por último, un vehículo eléctrico alimentado con pilas de combustible permite aprovechar la energía cinética del vehículo cuando éste se detiene: un vehículo con M.C.I., cuando disminuye su velocidad mediante el freno, convierte su energía cinética en energía calorífica no aprovechable (Martín A, 2009).

A su vez, ciertas características podrían considerarse desventajas frente a las de los combustibles de origen fósil y biocombustibles:

- Posee un bajo P.C.I. por unidad de volumen, lo que requiere recipientes de almacenamiento grandes (Martín et al, 2004, Amadeo N et al, 2004). Además, su transporte y almacenamiento son costosos y complejos (Amadeo N et al, 2004).
- Al igual que ocurre con los biocombustibles, se trata de un combustible secundario, es decir, se debe consumir energía para su obtención a partir de las distintas materias primas (agua, biomasa, combustibles fósiles), ya que no existe en estado elemental (Barry D. et al, 2000).
- A diferencia de los combustibles fósiles y biocombustibles, su uso en vehículos exige en la actualidad una inversión en la adaptación de los mismos (Tecnociencia 2005).
- La producción de algunos componentes de las pilas de combustibles son de elevado coste al no efectuarse a gran escala. Se estima que un coche con pila de combustible cuesta un 30% más que uno de gasolina o diesel con prestaciones similares, aunque se espera que, conforme se incremente la demanda, los precios se vayan equiparando (Tecnociencia 2005).
- Al ser una tecnología emergente, existen ciertos problemas que aún no han sido resueltos y que afectan al funcionamiento de la pila de combustible, especialmente en lo que respecta a su vida útil, lo que repercute en su comercialización (Tecnociencia 2005).

4. ANÁLISIS DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA AUTOMOCIÓN

4.1. VARIABLE ELEGIDA PARA REALIZAR LA COMPARACIÓN ECONÓMICA DE DIFERENTES COMBUSTIBLES

La variable óptima para comparar combustibles destinados a automoción es el coste de la energía medida sobre el P.C.I. del combustible por unidad de masa.

Los combustibles de origen fósil, que se utilizan en

motores de ciclos Otto y Diesel, son la gasolina y el gasoil respectivamente y sus características se muestran en la Tabla 1.

	Gasolina 95	Gasoil
P.C.I. por unidad de masa	43,53 MJ/kg	42,69 MJ/kg
Densidad	0,740 kg/L	0,865 kg/L
P.C.I. por unidad de volumen	32,21 MJ/L	36,93 MJ/L

Tabla 1: P.C.I. por unidad de masa, por unidad de volumen y densidades de los combustibles fósiles.

Fuente: Martín et al, 2004

La Tabla 2 muestra, para el período comprendido entre julio de 2003 y marzo de 2009, los valores máximos y mínimos de la cotización del petróleo. El petróleo se cotiza y se paga en dólares al tipo de cambio que haya en ese momento, por lo que no tiene por qué coincidir el momento de máxima o mínima cotización del mismo en euros y en dólares.

Cotización del barril Brent	En dólares	En euros
Máxima	\$133,19 (jul/08)	85,14 € (jun/08)
Mínima	\$40,44 (dic/08)	24,31 € (dic/03)

Tabla 2: Datos económicos más relevantes de la cotización del barril de petróleo en el período comprendido entre julio de 2003 y marzo de 2009.

Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

La Tabla 3 muestra, para el período comprendido entre julio de 2003 y marzo de 2009, los valores máximos y mínimos de las cotizaciones de los combustibles fósiles. Estos valores no tienen por qué coincidir en el tiempo con los costes del precio del petróleo en ese momento.

	Gasolina 95	Gasoil
Cotización máxima (jul/08)	21,18 €/GJ	22,28 €/GJ
Cotización mínima (dic/03)	8,97 €/GJ	7,75 €/GJ

Tabla 3: Cotizaciones máximas y mínimas de los combustibles fósiles entre julio de 2003 y marzo de 2009.

Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Un combustible alternativo a los combustibles fósiles debería tener un coste similar o inferior a estos para que sea rentable. A efectos de este trabajo, los autores considerarán que el hidrógeno o cualquier otro combustible alternativo a los de origen fósil:

1. Será siempre más competitivo que éstos, cuando su coste por unidad de energía sea siempre menor que el

coste mínimo sin impuestos marcado por cualquiera de los combustibles de origen fósil comercializados entre julio de 2003 y marzo de 2009. En este caso este valor es 7,75 €/GJ y se denomina “límite inferior de rentabilidad”.

- No se considerará competitivo cuando el coste por unidad de energía exceda el coste máximo por unidad de energía alcanzado por cualquiera de los combustibles de origen fósil entre julio de 2003 y marzo de 2009. En este caso este valor es 22,28 €/GJ y se denomina “límite superior de rentabilidad”.
- Existirá incertidumbre en torno a su competitividad, si el coste por unidad de energía se sitúa entre 7,75 €/GJ y 22,28 €/GJ.

Aunque no coinciden en el tiempo, se puede también tomar como referencia para los límites de rentabilidad las cotizaciones del petróleo máximas y mínimas entre julio de 2003 y marzo de 2009: 133,19 \$/barril y 40,44 \$/barril.

4.2. LA CLAVE DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES: LA COTIZACIÓN DEL PETRÓLEO

Se ha procedido a realizar un análisis para comprobar si existe una relación lineal entre el coste de los combustibles de origen fósil (gasolina 95 y gasoil) y la cotización del petróleo. El petróleo se cotiza y paga en dólares, por lo que para llevar a cabo este análisis para el caso de España es necesario conocer su cotización, el tipo de cambio medio del

mes y el coste medio de la gasolina 95 y del gasoil en dicho mes. Tomando los datos del Ministerio de Industria a partir de los informes mensuales que publica respecto a los costes de la gasolina y el gasoil, así como de la cotización del crudo se obtiene el gráfico 1:

Para el caso de la gasolina, el análisis de regresión lineal arroja un valor de R^2 es 0,942 y el coeficiente de correlación lineal es 0,971 y para el gasoil el valor de R^2 es 0,934 y el coeficiente de correlación lineal es 0,967.

El contraste de Kolmogorov-Smirnov ha permitido corroborar para ambos combustibles fósiles que el ajuste lineal es muy conveniente al 99% ($\alpha=0,01$), lo que permite concluir que sus costes, en términos de coste por unidad de energía sobre el P.C.I., están relacionados de forma lineal con el precio de petróleo.

Parece lógico pensar que los productos que pueden sustituir a la gasolina 95 y al gasoil tengan mayor penetración cuanto más alta sea la cotización del petróleo, ya que ésta hace aumentar de forma directa y lineal el coste de los combustibles fósiles.

4.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL HIDRÓGENO COMO BIOCOMBUSTIBLE

La Figura 1 muestra de forma esquemática la propuesta de ciclo de producción de hidrógeno por electrolisis de agua de mar.

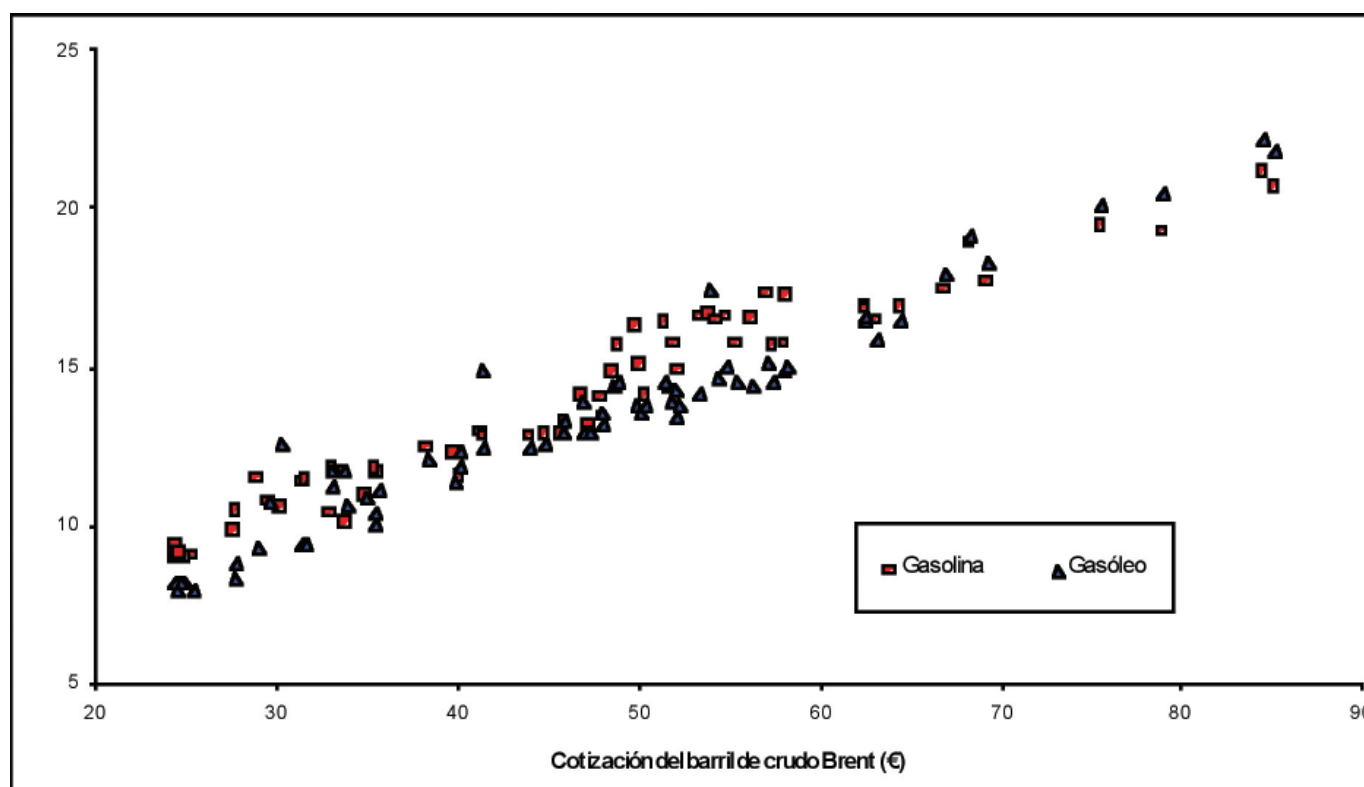


Gráfico 1: Análisis de regresión lineal de la cotización del barril de crudo Brent frente al coste de la gasolina 95 y del gasoil.

Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio / Autores

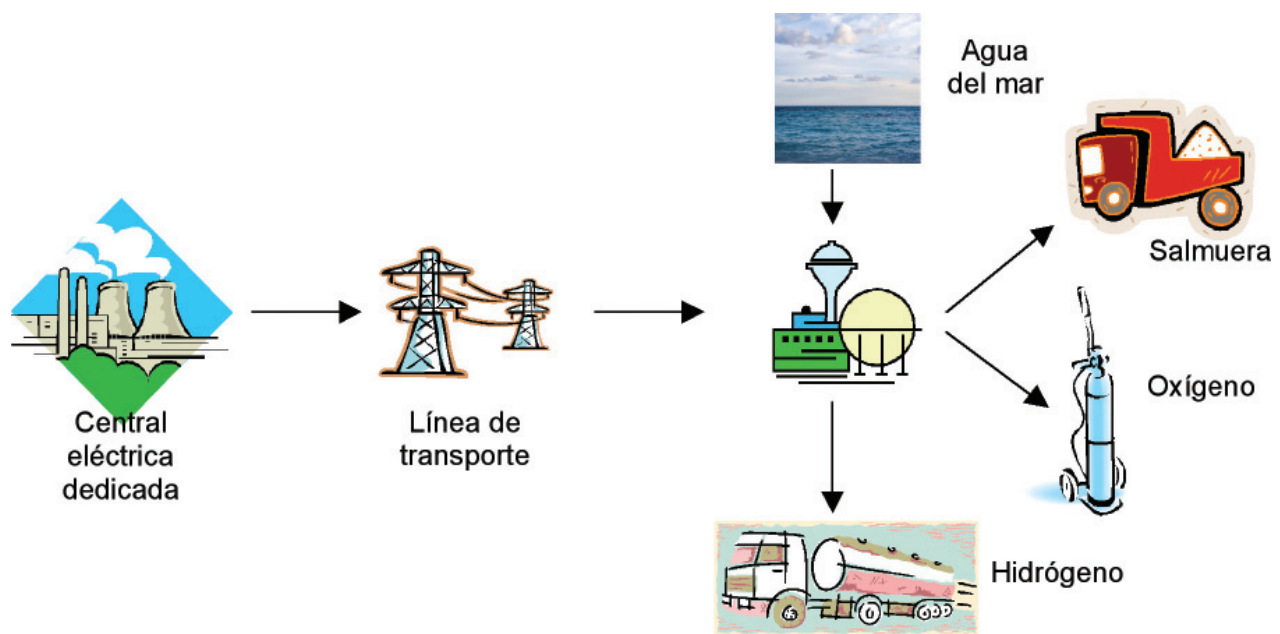


Figura 1: Ciclo de producción de hidrógeno por electrolisis de agua de mar.

Fuente: Autores

Para evaluar la viabilidad técnica y económica del hidrógeno como combustible se asumirán las siguientes hipótesis de partida:

- El hidrógeno se obtendrá por electrolisis de agua de mar, por lo que la planta se ubicará cerca de la costa.
- La energía eléctrica necesaria para descomponer el agua de mar por electrolisis será generada por una central eléctrica dedicada (es decir, no conectada a la red eléctrica nacional). Se ubicará cerca de la planta de electrolisis para minimizar las pérdidas energéticas.
- No se considerará el rendimiento económico de los subproductos del proceso de electrolisis (oxígeno y salmuera).

4.3.1. Cálculo del coste energético en la descomposición del agua

La entalpía de formación del agua es de 285,49 kJ/mol de agua, es decir, 285,49 kJ por cada 18 gramos de agua o, lo que es lo mismo, por cada 2 gramos de hidrógeno obtenidos. Así, para obtener un kilogramo de hidrógeno es necesario emplear 142.747 kJ de energía eléctrica (Babor, J; Ibarz, J, 1973).

El P.C.I. del hidrógeno es de 120.011 kJ/kg (Martín et al, 2004), por lo que se necesita más energía para separar el hidrógeno del agua que la que después se obtiene en forma de P.C.I.

4.3.2. Variables de trabajo

Se trabajará con las siguientes variables:

1. El coste de generación del kWh en bornes de central.
Como se ha comentado, se trata de una central dedicada,

por lo que el coste de generación es función del tipo de central que se construya para esta instalación.

2. El rendimiento del proceso de obtención del hidrógeno (energía obtenida en forma de P.C.I. del combustible frente a la energía generada en bornes de la central eléctrica dedicada).
3. El rendimiento económico del proceso de obtención de hidrógeno.

La Fórmula 1 muestra el cálculo del coste de obtención de la unidad de energía del hidrógeno en función del rendimiento del proceso y del coste de generación de la unidad de energía eléctrica en bornes de la central dedicada.

$$P \left(\frac{\text{€}}{\text{GJ}} \right) = \frac{P_e \left(\frac{\text{€}}{\text{GJ}} \right)}{\eta_e} \cdot \frac{D \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)}{PCI_{\text{Hidrógeno}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} \quad [1]$$

Donde:

- P es el coste del hidrógeno obtenido en €/GJ
- P_e es el coste de la energía eléctrica generada en bornes de la central eléctrica en €/kWh
- η_e es el rendimiento económico del proceso de obtención de hidrógeno, es decir, es la forma de incorporar a la fórmula el resto de costes de la planta
- D es el coste energético de la electrolisis del agua, en MJ/kg de hidrógeno
- $PCI_{\text{Hidrógeno}}$ es el P.C.I. del hidrógeno en MJ/Hg de hidrógeno.

La Unión Europea llevó a cabo el proyecto ExternE para evaluar los costes de generación de energía eléctrica para diferentes tipos de centrales incluyendo todas las externalidades. A título de ejemplo, para el caso de las

centrales nucleares se incluye la gestión de los residuos que se producen. Los resultados de dicho proyecto se muestran en la Tabla 4.

Tipo de central	Coste	
	€/kWh	€/GJ
Carbón	0,070	19,44
Fuel Oil	0,060	16,67
Gas natural	0,039	10,83
Nuclear	0,035	9,72
Hidráulica	0,047	13,06
Eólica	0,062	17,22

Tabla 4: Coste de producción por unidad de energía generada en bornes de central (incluyendo las externalidades). Fuente: Comisión Europea Proyecto ExternE

Se calcula así el coste por unidad de energía sobre el P.C.I. en función del rendimiento del proceso y del tipo de central eléctrica aplicando la fórmula 1. Esto se muestra en la Tabla 5.

Tipo	Rendimiento						
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Carbón	25,70	28,91	33,04	38,55	46,26	57,82	77,09
Fuel Oil	22,03	24,78	28,32	33,04	39,65	49,56	66,08
Gas natural	14,32	16,11	18,41	21,48	25,77	32,21	42,95
Nuclear	12,85	14,46	16,52	19,27	23,13	28,91	38,55
Hidráulica	17,25	19,41	22,18	25,88	31,06	38,82	51,76
Eólica	22,76	25,61	29,26	34,14	40,97	51,21	68,28

Tabla 5: Coste de producción por unidad de energía obtenida en forma de P.C.I. del hidrógeno (en €/GJ) en función del rendimiento del proceso. Fuente: Autores

Los valores en negrita de la Tabla 5 muestran aquellos que mejoran los precios históricos de los combustibles fósiles según el criterio adoptado por los autores. La Figura 2 muestra estos mismos resultados de forma gráfica.

5. RESULTADOS

A continuación se muestran las conclusiones de la comparación en términos de contenido energético, de precio y de costes de producción para combustibles fósiles e hidrógeno.

5.1. SI EL HIDRÓGENO SE UTILIZA EN UN M.C.I.

En este caso, el rendimiento que se obtiene sobre el P.C.I. es un 25% superior al que se obtendría con un combustible de origen fósil. A pesar de esta mejora se adoptará un criterio conservador y se estimará que el rendimiento es similar.

Según lo adoptado por los autores, todos los puntos por debajo del límite inferior de rentabilidad marcado en el

Gráfico 2 son valores del rendimiento y precio de la electricidad en el que la producción del hidrógeno es siempre más atractiva que el uso de combustibles fósiles. Como se puede ver, para los diferentes tipos de centrales eléctricas no existen valores de rendimiento para un tipo de central eléctrica dada que hagan siempre rentable la producción de hidrógeno por electrolisis.

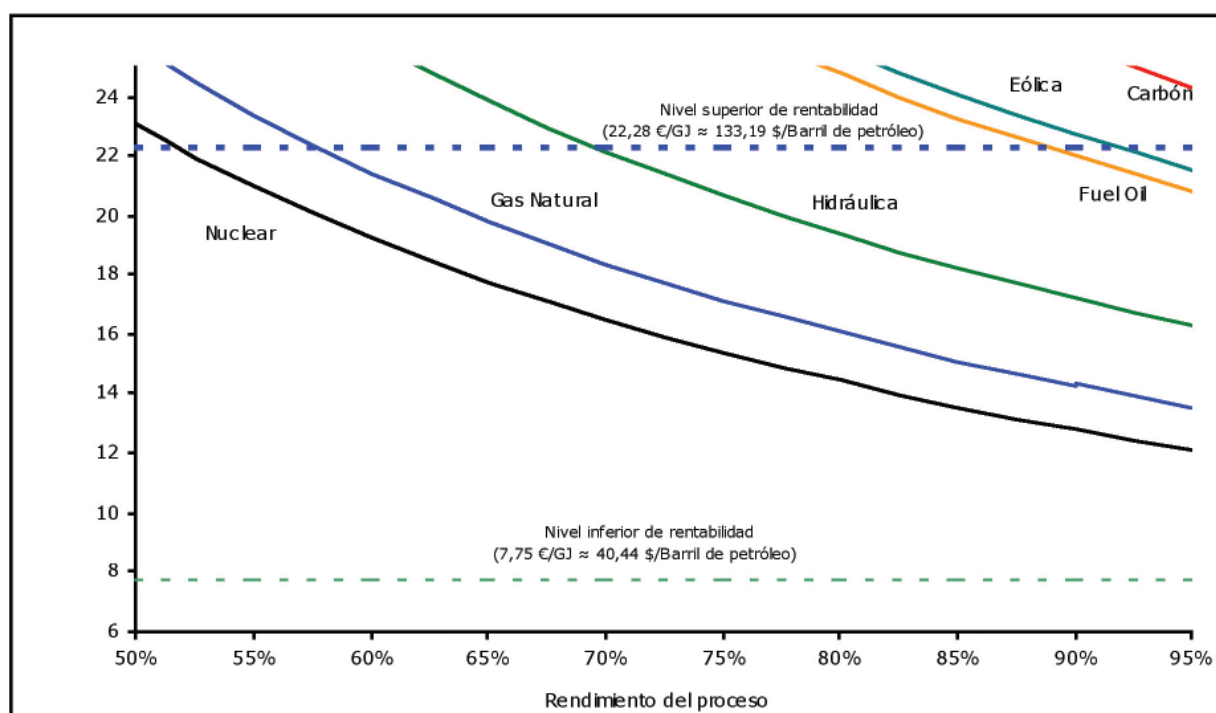


Figura 2: Coste de producción por unidad de energía generada en bornes de central en función del rendimiento y del tipo de central eléctrica. Fuente: Autores.

Sin embargo existen combinaciones de tipos de centrales eléctricas y de rendimientos que hacen que la producción de hidrógeno pueda ser rentable según la cotización que pueda tomar el petróleo. Observando el Gráfico 2 se constata algo que era previsible: que la rentabilidad aumenta, cuando

tomar el petróleo, al encontrarse los costes entre los valores mínimo y máximo de rentabilidad.

El ahorro de petróleo en ktep dado para la energía eléctrica producida por una determinada planta viene dado por la Fórmula 2.

$$E_H (\text{ktep}) = E (\text{MW} \cdot \text{año}) \cdot 325 \left(\frac{\text{día}}{\text{año}} \right) \cdot 24 \left(\frac{\text{hora}}{\text{día}} \right) \cdot \eta_p \cdot 1000 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{MWh}} \right) \cdot 86 \cdot 10^{-9} \left(\frac{\text{ktep}}{\text{kWh}} \right) \cdot \frac{D \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)}{\text{PCI}_{\text{Hidrógeno}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} \quad [2]$$

aumenta el rendimiento y/o cuando se abarata el coste de la energía producida en la central eléctrica.

5.2. SI EL HIDRÓGENO SE UTILIZA EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE EN VEZ DE EN UN M.C.I.

En este caso se estima que el rendimiento del hidrógeno (medido sobre el P.C.I.) es del doble tal y como se explicó en el punto 2, por lo que si se compara el uso del hidrógeno en pila de combustible frente al uso de combustibles fósiles en vehículos, los límites interior y superior de rentabilidad del Gráfico 2 estarían desplazados hacia arriba, de tal forma que el límite inferior de rentabilidad se situaría en 15,5 €/GJ (=2•7,75 €/GJ) y el límite superior de rentabilidad en el

Donde:

- E_H es la energía en ktep obtenida en forma de hidrógeno
- E es la energía eléctrica anual generada en MW•año
- η_p es el rendimiento del proceso de obtención de hidrógeno
- D es el coste energético de la electrolisis del agua, en MJ/kg de hidrógeno
- $\text{PCI}_{\text{Hidrógeno}}$ es el P.C.I. del hidrógeno en MJ/kg de hidrógeno.

La Tabla 6 muestra los resultados para un determinado rendimiento y una energía generada.

Energía anual (MW•año)	Rendimiento sobre la energía aportada por la central						
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
100	57	51	44	38	32	25	19
500	285	253	222	190	158	127	95
1.000	570	507	443	380	317	253	190
1.500	855	760	665	570	475	380	285

Tabla 6: Energía equivalente obtenida en forma de hidrógeno si se emplease en M.C.I., en función del rendimiento de la extracción y la potencia de la central eléctrica (en ktep).

Fuente: Autores.

valor 44,56 €/GJ (=2•22,28 €/GJ). De esta manera aparecen combinaciones de tipo de central y rendimientos que hacen rentable siempre el hidrógeno frente a los combustibles fósiles. Por ejemplo: una central de gas natural con un rendimiento del 90% o una central nuclear con rendimientos superiores al 80%. Lógicamente también se amplían las combinaciones tipo de central – rendimiento que hacen que la producción de hidrógeno pueda ser rentable según la cotización que pueda

En España se consumieron 32.126 ktep en forma de gasolina y gasoil de automoción en 2008 (cores.es). La Tabla 7 muestra el porcentaje de ahorro para una central dada su potencia y su rendimiento.

Si en vez de emplearse el hidrógeno en M.C.I., se emplease en pilas de combustible, la eficiencia sobre el P.C.I. sería el doble, por lo que los resultados mostrados en las tablas 9 y 10 se multiplicarían por dos.

Energía anual (MW•año)	Rendimiento sobre la energía aportada por la central						
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
100	0,18%	0,16%	0,14%	0,12%	0,10%	0,08%	0,06%
500	0,89%	0,79%	0,69%	0,59%	0,49%	0,39%	0,30%
1.000	1,77%	1,58%	1,38%	1,18%	0,99%	0,79%	0,59%
1.500	2,66%	2,37%	2,07%	1,77%	1,48%	1,18%	0,89%

Tabla 7: Ahorro en % sobre el consumo total de gasolina y gasoil en España para el año 2008 para una central eléctrica en función de su potencia y del rendimiento del proceso en el caso de que el hidrógeno se emplease en M.C.I. Fuente: Autores.

5.3. COSTES Y EMISIONES DE CO₂ EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CENTRAL ELÉCTRICA EMPLEADA

El rendimiento del proceso de obtención del hidrógeno no depende del tipo de central eléctrica utilizada. Del tipo de central depende:

- Las emisiones de gases contaminantes
- El coste de la unidad energía generada en bornes de la central.

Las emisiones de CO₂ para cada tipo de central medido sobre la potencia de salida en bornes se muestran en la Tabla 8.

	Emisiones de CO ₂	
	g/kWh	g/MJ
Carbón	960	3.456
Fuel Oil	720	2.592
Gas natural	480	1.728
Nuclear	6	21,6
Hidráulica	4	14,4
Eólica	3 - 22	10,8 - 79,2
Fotovoltaica	50 - 150	180 - 540

Tabla 8: Emisiones de CO₂ según el tipo de central eléctrica.

Fuente: Sociedad Francesa de Energía Nuclear.

Con estas emisiones se puede calcular las emisiones por unidad de energía (MJ) sobre el P.C.I. en función del rendimiento del proceso. La Fórmula 3 muestra cómo se obtienen estos valores.

$$G \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) = \frac{G_e \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right)}{\eta_p} \cdot \frac{D \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)}{\text{PCI}_{\text{Hidrógeno}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} \quad [3]$$

Donde:

- G son los gramos de CO₂ emitidos por unidad de energía sobre el P.C.I. del hidrógeno en g/MJ

- G_e son las emisiones de CO₂ por unidad de energía eléctrica generada en la central en g/MJ
- η_p es el rendimiento del proceso de obtención de hidrógeno
- D es el coste energético de la electrolisis del agua, en MJ por kg de hidrógeno
- PCI_{Hidrógeno} es el P.C.I. del hidrógeno en MJ por kg de hidrógeno.

Los resultados para los distintos tipos de centrales eléctricas y para diferentes rendimientos del proceso se muestran en la Tabla 9.

Los combustibles fósiles generan entre 73,15 g/MJ para el caso de la gasolina y 74,71 g/MJ para el caso del gasoil sólo en la combustión. Los valores en negrita de la Tabla 9 muestran aquellos que mejoran las emisiones de los combustibles fósiles, de donde se deduce que:

- Realizar la electrolisis del agua para la obtención del hidrógeno con energía de origen fósil (carbón, fuel oil y gas natural) o fotovoltaica produce siempre más emisiones de CO₂ que quemar directamente el combustible fósil en el vehículo.
- Realizar la electrolisis del agua mediante una planta eléctrica nuclear, hidráulica, o eólica se genera casi siempre menos CO₂ que si se obtuviese la energía directamente en el vehículo quemando un combustible fósil.
- Utilizar el hidrógeno en pilas de combustible en vez de quemarlo en un motor de combustión interna alternativo reduce a la mitad las emisiones de CO₂, ya que se ha estimado que el rendimiento de una pila de combustible es el doble que el de un motor de combustión interna alternativo.

6. CONCLUSIONES

En artículos anteriores, los autores expusieron que forzar la producción y consumo de combustibles de origen vegetal no es rentable, porque es muy difícil que éstos compitan con los de origen fósil, ya que éstos últimos se extraen del subsuelo, se procesan y se entregan al consumidor, mientras que los primeros exigen un proceso de producción complejo,

Tipo	Rendimiento						
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Carbón	4.567	5.138	5.872	6.851	8.221	10.277	13.702
Fuel Oil	3.426	3.854	4.404	5.138	6.166	7.708	10.277
Gas natural	2.284	2.569	2.936	3.426	4.111	5.138	6.851
Nuclear	29	32	37	43	51	64	86
Hidráulica	19	21	24	29	34	43	57
Eólica	14-103	16-117	18-132	21-154	26-191	32-235	43-315
Fotovoltaica	238-714	268-804	306-918	357-1.071	428-1.284	535-1.605	714-2.142

Tabla 9: Emisiones de CO₂ por unidad de energía (g/MJ) obtenida en forma de P.C.I. del hidrógeno y en función del rendimiento del proceso. Fuente: Autores.

caro desde el punto de vista económico y energético y de muy bajo rendimiento (Hernández et al, 2009). Se mostró además que los combustibles de origen vegetal generan prácticamente el mismo CO₂, que el que generan los de origen fósil cuando se queman. Es cierto que la materia prima de los primeros ha absorbido CO₂ antes de llegar a la planta de procesamiento, pero esta absorción no siempre debe considerarse en el balance de masas y energía (F.H. Sobrino et al 2009). Por último se destacó que se está importando gran parte de la materia prima necesaria para la elaboración del etanol y el biodiesel, lo que pone en entredicho el objetivo de la Directiva Europea 2003/30/EC para la disminución energética exterior de la Unión, ya que se pasa de depender del petróleo a depender de la materia prima para la elaboración de biocombustibles (F.H. Sobrino et al 2009).

Se ha expuesto que para evaluar combustibles potenciales sustitutos de los combustibles fósiles para automoción, la variable a comparar es el precio por unidad de energía del P.C.I. y se ha demostrado que las cotizaciones de los combustibles fósiles de automoción están muy relacionadas de forma lineal con la cotización del petróleo, por lo que los potenciales sustitutos de los mismos son más competitivos cuanto más alto se cotee el petróleo.

Como alternativa a los combustibles fósiles y a los biocombustibles de origen vegetal se encuentra el uso del hidrógeno en automoción, tanto para ser quemado en un motor de combustión interna alternativo como utilizado en una pila de combustible.

De los resultados del análisis realizado se concluye que, bajo ciertas condiciones, podría ser rentable producir hidrógeno para automoción mediante electrolisis de agua de mar con una central eléctrica dedicada sin necesidad de recurrir a subvenciones ni exenciones fiscales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 2003/30/EC Directive of the European Parliament and the Council – 8th may 2003. on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport
- Amadeo N et al – 2004 – Producción de H₂ para pilas de combustible a partir de recursos renovables – <http://www.cori.unicamp.br/Arquivos/Energia/Laborde.ppt> – último acceso 10-5-09
- Arias Paz – Manual de automóviles, 56ª edición – Editorial Dossat, 2006
- Barry D et al (2000) – Hydrogen: a path for the future – Communications Department of the ministère des Ressources naturelles. – Quebec – http://www.mrn.gouv.qc.ca/english/publications/energy/path_future.pdf – Último acceso – 5-5-09
- Babor J, Ibarz "Química General Moderna". Editorial Marín, S. A. Barcelona (1973)

- Boletín Trimestral de Coyuntura Energética. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. – <http://www.mityc.es/energia/balances/Balances/CoyunturaTrimestral/2007/COY4T07.pdf> – Último acceso 25-6-09
- Belt.es – http://www.belt.es/noticiasmb/HOME2_noticias.asp?id=342 – enero de 2006 – Último acceso 20-5-09
- Comisión Europea Proyecto ExternE – <http://externe.jrc.ec.europa.eu/> – Último acceso 25-5-09
- Cores.es – <http://www.cores.es/adjuntos/Consumos%202007.xls> – Último acceso 26-5-09
- Sobrino FH, Monroy CR. Critical analysis of the European Union Directive which regulates the use of biofuels: An approach to the Spanish case Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 13, Issue 9, December 2009, Pages 2675-2681
- Hernández-Sobrino F, Rodríguez-Monroy C, Hernández-Pérez JL. Análisis técnico y económico del etanol y del biodiesel como sustitutos de combustibles fósiles para automoción en España. DYNA Ingeniería e Industria. noviembre de 2009. Vol 84 p.656-664
- INEa. <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/a1998/10/&fi le=e01002.px&type=pcaxis&tl=0> – Última consulta: 13-5-09
- INEb. <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/a1998/10/&fi le=e03001.px&type=pcaxis&tl=0> – Última consulta: 28-5-09
- INEd. <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/e01/10/&fi le=01001.px&type=pcaxis&tl=0> – última consulta 1-1-09)
- Informes mensuales de los precios de los carburantes – Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. – <http://www.mityc.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesMensuales/Paginas/IndexInformesMensuales.aspx> – Último acceso – 25-5-09
- Libro de la Energía en España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. – <http://www.mityc.es/energia/es-ES/Servicios1/Destacados/LaEnerg%C3%ADaEnEspa%C3%B1a2007.pdf> – última consulta 25-6-09
- Martín A et al (2009) – Guía del vehículo eléctrico – Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid – <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-2009-fenercom.pdf> – última visita 25/1/2010
- Martín F, Sala (2004) – Estudio comparativo entre los combustibles tradicionales y las nuevas tecnologías energéticas para la propulsión de vehículos destinados al transporte – Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Màquines i Motors Tèrmics
- Muñoz M, Payri Motores de combustión interna alternativos, Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros industriales – Fundación General U.P.M. 1989