

La alternativa factible a los combustibles fósiles en España: El hidrógeno.

Carlos Rodríguez Monroy¹

¹Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística de la Universidad Politécnica de Madrid. crmonroy@etsii.upm.es

Resumen

La Unión Europea ha apostado por los biocombustibles como sustitutos de los combustibles fósiles. 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, de 9 de octubre y por lo tanto no cuenta con los beneficios fiscales que tienen éstos.

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

1. Introducción.

En artículos previos (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, se analizaron las ventajas potenciales de su uso y se llevó a cabo un análisis crítico de los mismos así como de las medidas que se han puesto en marcha para incentivarlos como la directiva europea 2003/30/EC y las ventajas fiscales que se les han dado, evaluando de forma empírica si las ventajas potenciales 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, de 9 de octubre y por lo tanto no cuenta con los beneficios fiscales que tienen éstos.

2. Posibilidades de uso del hidrógeno en automoción.

El hidrógeno se puede emplear en automoción de dos formas distintas. Se puede emplear como combustible de un motor de combustión interna alternativo (M.C.I.). En este caso su rendimiento máximo sobre el poder calorífico inferior (P.C.I.) es del 27% aproximadamente (rendimiento medido como el cociente entre la energía mecánica a la salida del eje del motor y la energía entregada por el combustible). También se puede emplear como combustible de una pila de combustible. En este caso el rendimiento está en torno al 60% sobre el P.C.I. (rendimiento medido como el cociente entre la energía entregada por el eje del motor eléctrico y la energía entregada por el combustible de la pila).

3. Ventajas e inconvenientes del uso del hidrógeno como combustible para automoción.

El hidrógeno presenta las siguientes características que se pueden considerar ventajosas en su uso en automoción ya que se trata de un elemento de elevado P.C.I. por unidad de masa (es tres veces más ligero que la gasolina o el gasoil) y 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). Además, en el caso de que el

hidrógeno se obtenga, por ejemplo, mediante electrolisis, se minimiza el impacto medioambiental provocado por la extracción de petróleo.

Por otra parte se puede emplear en pilas de combustible y en M.C.I. Además, en el caso de aplicarse en pilas de combustible su rendimiento energético es mayor (convertir el combustible en energía eléctrica es más eficiente que quemarlo al estar este último sujeto a la segunda Ley de la Termodinámica. Por otra parte la disponibilidad de la energía es similar a la de un vehículo con motor M.C.I. y muy superior a la de un vehículo eléctrico con baterías recargables. Finalmente permite aprovechar la energía cinética del vehículo cuando éste se detiene al convertirla en energía eléctrica mientras que un vehículo con M.C.I. la convierte en calor en los frenos.

A su vez, ciertas características podrían considerarse desventajas frente a las de los combustibles de origen fósil y biocombustibles ya que posee un bajo P.C.I. por unidad de volumen, lo que requiere recipientes de almacenamiento grandes y su transporte y almacenamiento son, además, costosos y complejos. Además, 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. Finalmente, al ser una tecnología emergente, existen ciertos problemas que aún no han sido resueltos y que afectan al funcionamiento, especialmente en lo que respecta a su vida útil, lo que repercute en su comercialización. Además tiene una demanda pequeña, por lo que su precio no puede competir con el de las tecnologías convencionales. Es de esperar que, conforme la demanda se incremente, los precios se vayan equiparando.

4. Descripción del análisis del hidrógeno como combustible para automoción.

4.1. Límites de la rentabilidad del hidrógeno.

La tabla 1 muestra los valores máximos y mínimos de la cotización del petróleo entre julio de 2003 y marzo de 2009. 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.

Tabla 1: 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.

	En dólares	En euros
Cotización máxima	\$133,19 (jul/08)	85,14 € (jun/08)
Cotización mínima	\$40,44 (dic/08)	24,31 € (dic/03)

La tabla 2 muestra los valores máximos y mínimos del coste de los combustibles fósiles entre julio de 2003 y marzo de 2009.

Tabla 2: Datos económicos más relevantes de los combustibles fósiles en el período comprendido entre julio de 2003 y marzo de 2009. Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

	Gasolina 95	Gasoil
Coste máximo sin impuestos (jul/08)	21,18 €/GJ	22,28 €/GJ
Coste mínimo sin impuestos (dic/03)	8,97 €/GJ	7,75 €/GJ

Un combustible alternativo a los combustibles fósiles debería tener un coste similar o inferior a estos para que sea rentable. De esta forma se considera que el hidrógeno o cualquier otro combustible alternativo a los de origen fósil:

- Será siempre más competitivo cuando su coste por unidad de energía sea siempre menor que el coste mínimo sin impuestos marcado por cualquier combustible fósil comercializado entre julio de 2003 y marzo de 2009. Este valor es 7,75 €/GJ y se denomina “límite inferior de rentabilidad”.
- No se considerará competitivo cuando el coste exceda el coste máximo alcanzado por cualquiera de los combustibles fósiles 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 se sitúa entre 7,75 €/GJ y 22,28 €/GJ.

Aunque no coinciden en el tiempo, se puede también tomar como referencia unos precios de cotización del petróleo de 133,19 \$/barril y 40,44 \$/barril para los límites de rentabilidad.

4.2. La clave de la viabilidad 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. Se ha obtenido así, para el caso de la gasolina un valor de R^2 de 0,942 y un coeficiente de correlación lineal de 0,971 y para el gasoil un valor de R^2 de 0,934 y un coeficiente de correlación lineal de 0,967.

El contraste de Kolmogorov-Smirnov corrobora para ambos combustibles 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.

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

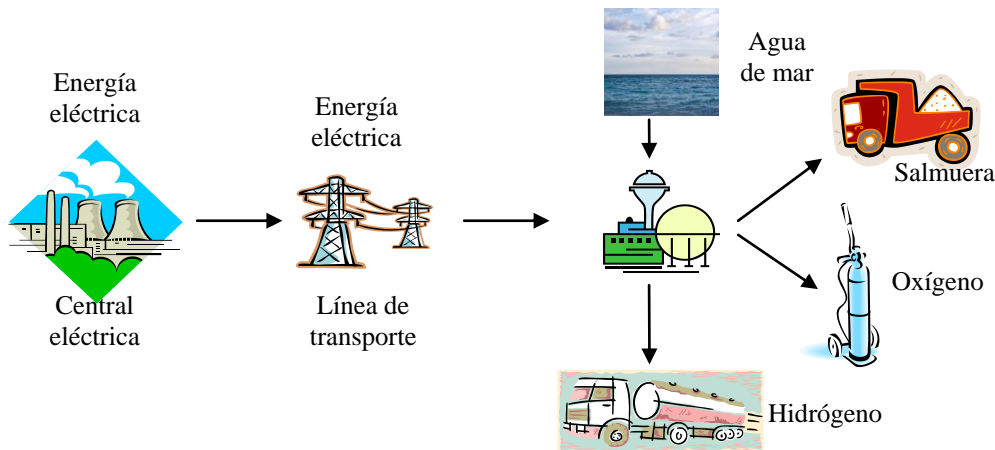


Figura 1: Ciclo de producción de hidrógeno por electrolisis de agua de mar. Fuente: Autores

Para evaluar la viabilidad técnica y económica del hidrógeno como combustible se asumirá que se obtendrá por electrolisis de agua de mar, por lo que la planta se ubicará en un lugar cercano a la costa. A su vez, en un lugar cercano y con el fin de minimizar las pérdidas eléctricas por el transporte, se dispondrá de una central eléctrica dedicada (no conectada a la red eléctrica nacional) y que suministrará la energía eléctrica necesaria para descomponer el agua de mar. Finalmente, no se considerarán los valores económicos de los subproductos del proceso de electrolisis como el oxígeno o la salmuera.

4.4. El coste energético de la electrolisis del agua.

La entalpía de formación del agua es de 285,49 kJ por mol, es decir, es la energía que se precisa para obtener 2 gramos de hidrógeno. Para obtener un kilogramo de hidrógeno es necesario emplear 142.747 kJ de energía.

El P.C.I. del hidrógeno es de 120.011 kJ por kg 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.

4.5. Variables de trabajo

Las variables son el coste de generación del kWh en bornes de central, que es función del tipo de central que se construya para esta instalación, 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) y 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.

$$P \left(\frac{\text{€}}{\text{GJ}} \right) = \frac{P_e \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)}{\eta_p} \cdot \frac{1000}{3,6} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{GJ}} \right) \cdot \frac{D \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)}{\text{PCI}_{\text{Hidrógeno}} \cdot \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)} \quad [1]$$

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_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.

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 genera. Los resultados de dicho proyecto se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Coste de producción por unidad de energía generada en bornes de central (incluyendo las externalidades). Fuente: Comisión Europea Proyecto ExternE

Carbón	0,070 €/kWh
Fuel Oil	0,060 €/kWh
Gas natural	0,039 €/kWh
Nuclear	0,035 €/kWh
Hidráulica	0,047 €/kWh
Eólica	0,062 €/kWh

Con estos costes se puede calcular 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 4.

Tabla 4: Coste de producción del hidrógeno (en €/MJ) en función del rendimiento del proceso. Fuente: Autores

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

Los valores en negrita de la tabla 4 muestran aquellos que se encuentran entre los límites inferior y superior de rentabilidad. No existen combinaciones que proporcionen un coste menor al límite inferior de rentabilidad. La figura 2 muestra estos mismos resultados de forma gráfica.

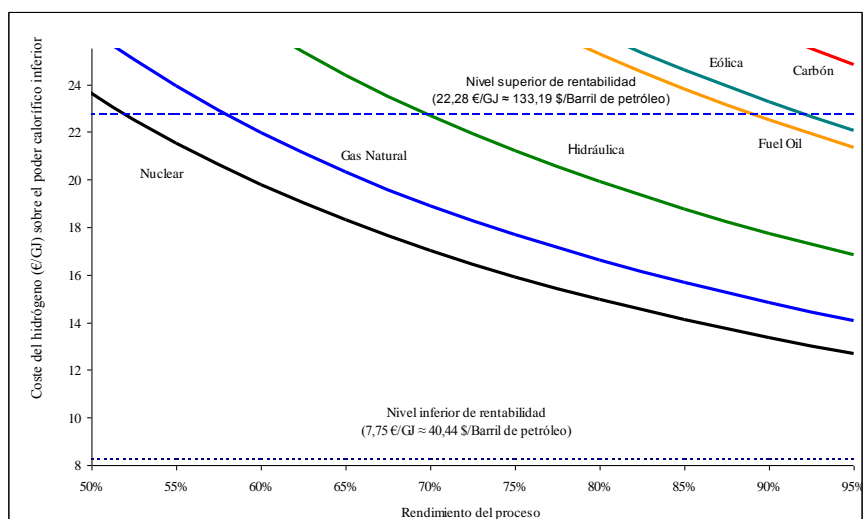


Figura 2: Coste de producción del hidrógeno en función del rendimiento y del tipo de central eléctrica. Fuente: Autores.

5. Resultados del análisis.

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 motor de combustión interna alternativo.

En este caso, el rendimiento que se obtiene sobre el P.C.I. es similar al obtenido con un combustible de origen fósil y según el criterio adoptado, todos los puntos por debajo del límite inferior de rentabilidad marcado en la figura 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 de proceso que hagan siempre rentable la producción de hidrógeno por electrolisis.

Sin embargo existen combinaciones de tipos de centrales eléctricas y de rendimientos que hacen que la producción de hidrógeno se sitúe entre los límites inferior y superior de rentabilidad. Lógicamente se hace más rentable cuanto mayor sea el rendimiento y cuanto menor sea el precio de la energía producida en la central eléctrica.

5.2. Si el hidrógeno se utiliza en una pila de combustible.

El rendimiento es sensiblemente superior y se puede estimar que una unidad de energía en forma de P.C.I. que se aplicase en una pila de combustible equivaldría a dos unidades de energía en forma de P.C.I. destinadas a un M.C.I., es decir, utilizar hidrógeno en pilas de combustibles es el doble de eficaz que quemarlo en un M.C.I.

Así pues, el uso del hidrógeno en pilas de combustible hace que los límites inferior y superior de rentabilidad del gráfico 2 estén desplazados hacia arriba, de tal forma que el límite inferior se situaría en el valor 15,5 €/GJ y el límite superior en el valor 44,56 €/GJ, por lo que existe un margen más grande de valores que hacen rentable la producción de hidrógeno.

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

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

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 por kg de hidrógeno.
- $\text{PCI}_{\text{Hidrógeno}}$ es el P.C.I. del hidrógeno en MJ por kg de hidrógeno.

La tabla 5 muestra los resultados para un determinado rendimiento y una energía generada.

Tabla 5: 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.

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

En España se consumieron en 2008 32.126 ktep en forma de gasolina y gasoil (cores.es). La tabla 6 muestra el ahorro (en %) según la potencia de una central y el rendimiento del proceso.

Tabla 6: 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.

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%

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 5 y 6 se multiplicarían por dos.

5.3. Emisiones de CO₂ en función del tipo de central eléctrica empleada.

Las emisiones de CO₂ dependen del tipo de central eléctrica empleada para la producción de hidrógeno. Dichos valores se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Emisiones de CO₂ por unidad de energía generada en bornes de central. Fuente: Sociedad Francesa de Energía Nuclear.

	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

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.

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

Donde:

- G es el CO₂ emitido por unidad de energía sobre el P.C.I. del hidrógeno en g/MJ.
- G_e es el CO₂ emitido 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/kg.

Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: 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.

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

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 8 muestran aquellos que mejoran las emisiones de los combustibles fósiles, de donde se deduce que obtener hidrógeno mediante electrolisis del agua con la energía de una central nuclear, hidráulica, o eólica genera casi siempre menos CO₂ que si se obtuviese la energía directamente en el vehículo quemando un combustible fósil.

Además, la utilización del hidrógeno en pilas de combustible en vez de en un M.C.I. 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 relación a los precios por unidad de energía, se ha demostrado que los de los combustibles fósiles de automoción están relacionados linealmente con la cotización del petróleo, por lo que sus potenciales sustitutos son más competitivos cuanto más alto se cotee el petróleo.

De los resultados del análisis realizado, se concluye que dependiendo del coste del kWh en bornes de la central eléctrica dedicada y del rendimiento del proceso de obtención del hidrógeno, existe un amplio abanico de posibilidades en donde la generación de hidrógeno por electrolisis según el modelo propuesto es rentable sin necesidad de recurrir a subvenciones ni exenciones fiscales.

Finalmente se ha mostrado que si la planta eléctrica es de origen eólico o hidráulico, con rendimientos del proceso globales que van desde el 30% hasta el 90% o es de origen nuclear con rendimientos globales que van desde el 40% al 90% se genera, por unidad de energía del hidrógeno obtenido, mucho menos CO₂ que si se emplease combustibles fósiles o biocombustibles. Si se emplean plantas de carbón, de fuel oil, de gas natural o fotovoltaicas las emisiones de CO₂ son muy superiores a que si se emplease combustible fósil directamente en los vehículos.

Referencias.

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.

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/noticiasmdb/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

F.H. Sobrino, C.R. Monroy. 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, J.L. 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

INEa - <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/a1998/10/&file=e01002.px&type=pcaxis&L=0> - Última consulta: 13-5-09

INEb - <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/a1998/10/&file=e03001.px&type=pcaxis&L=0> - Última consulta: 28-4-09

INEd - <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t04/a082/e01/10/&file=01001.px&type=pcaxis&L=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> - Ultimo 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 , F; Sala, V. (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