



# Trabajo Fin de Máster Energías Renovables y Eficiencia Energética

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA DE LOS  
VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE

Autora

Ana Luisa Olona Solano

Directora

Inmaculada Arauzo Pelet

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza  
2013

*A mis hijas, Marsia y Natalia. A mis padres.  
Y a mi amado esposo, Ernesto, por todo  
el apoyo incondicional y ánimo constante  
que me ha dado.*

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización del presente trabajo fin de Máster ha requerido de sacrificios en cuanto a dedicación, perseverancia, y esfuerzo a lo largo de todo este tiempo y constituye un paso más para ampliar mi formación profesional y conocimientos en el campo del automóvil, campo éste que me ha apasionado desde el momento que inicie mis estudios de ingeniería, y ampliar mis conocimientos en el campo de las energías renovables.

En primer lugar, quiero tener un agradecimiento especial con la Directora del Trabajo Fin de Máster: Inmaculada Arauzo Pelet, por la ayuda que me ha dado, por sus adecuadas sugerencias y por su paciencia. Su apoyo y su total implicación han sido esenciales para poder concluir este trabajo.

También tengo que agradecer a la Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón por solucionarme algunas dudas que me han ido surgiendo durante la elaboración de este trabajo.

En el contexto privado, agradecer enormemente todo el apoyo incondicional recibido por Ernesto desde el momento que decidí realizar este Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética.

# **ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE**

## **RESUMEN**

El objetivo general del presente proyecto es analizar si un vehículo que utiliza como combustible H<sub>2</sub> es energéticamente rentable y eficiente con el estado actual de la tecnología. Para alcanzar dicho objetivo, en primer lugar se ha llevado a cabo un estudio sobre el estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible analizando un total de total de 262 vehículos agrupados por fabricantes y elaborando una tabla. Con el análisis de dicha tabla se ha estudiado la evolución de los vehículos de pila de combustible en los últimos 20 años y se ha analizado el estado actual del vehículo de pila de combustible para cada fabricante. El siguiente paso ha consistido en llevar a cabo una revisión sobre el estado del arte de este tipo de vehículos teniendo en cuenta aspectos medioambientales y económicos. Tras esta revisión se han identificado los aspectos técnicos más importantes relativos al desarrollo de la pila de combustible. La mayoría de los estudios sobre el impacto medioambiental comparan las emisiones de la cadena de producción de hidrógeno con las emisiones de la cadena de producción de un combustible fósil, concluyendo que la reducción de emisiones es una gran ventaja de los vehículos de pila de combustible sobre las tecnologías basadas en combustible fósil.

Una vez analizado el estado del arte se han definido aquellos parámetros relevantes a tener en cuenta para comparar la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos que utilizan H<sub>2</sub> como combustible frente a vehículos alimentados por otro tipo de combustible. Dado a que se plantea el uso del H<sub>2</sub> como combustible, se ha revisado y analizado la posibilidad de suministro de este tipo de combustible analizando las características del hidrógeno suministrado, concluyendo que la infraestructura de hidrógeno que existe en la actualidad no es suficiente y que la viabilidad económica de este tipo de vehículos está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora del sistema de almacenamiento del H<sub>2</sub> en los vehículos y sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.

Para completar el análisis de la viabilidad de estos vehículos se ha considerado necesario llevar a cabo una comparación del vehículo de pila de combustible con un vehículo eléctrico en el escenario energético global y con el vehículo de gasolina convencional.

Por último se ha llevado a cabo un análisis de la viabilidad de producir H<sub>2</sub> mediante fuentes de energías renovables para suministrar este combustible a los vehículos, concluyendo que la energía renovable que podría cubrir la demanda de energía para alimentar a la flota nacional de turismos, si éstos fuesen vehículos de pila de combustible sería la energía eólica. Por otro lado, en cuanto a la biomasa, la utilización de un cultivo energético, como podría ser el chopo, permitiría generar el hidrógeno necesario para abastecer a dicha flota de vehículos.

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
1. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (1992-2012) .....	2
2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.....	8
2.1. Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible.....	8
2.2. Impacto ambiental de los FCVs.....	11
2.3. Análisis económico de los FCVs. ....	12
2.4. Estado actual de los FCVs. ....	14
3. FÁCTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.....	15
4. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO DE ESTE TIPO DE COMBUSTIBLE (H <sub>2</sub> ). ....	21
4.1. Producción de H <sub>2</sub> . ....	21
4.2. Almacenamiento de H <sub>2</sub> .....	22
4.3. Infraestructura de transporte y distribución del H <sub>2</sub> .....	24
5. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.....	25
5.1. Comparativa económica de los distintos tipos vehículos. ....	27
6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H <sub>2</sub> MEDIANTE FUENTES RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE A LOS VEHÍCULOS. ....	32
6.1. Análisis del H <sub>2</sub> necesario para alimentar a la flota actual de vehículos en España y análisis de la forma de producirlo.....	34
7. CONCLUSIONES. ....	36
8. BIBLIOGRAFÍA. ....	39

## ANEXOS

ANEXO I. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (1992-2012).

ANEXO II. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.

ANEXO III. FACTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.

ANEXO IV. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO DE ESTE TIPO DE COMBUSTIBLE (H<sub>2</sub>).

**ANEXO V. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.**

**ANEXO VI. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H<sub>2</sub> MEDIANTE FUENTES RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE A LOS VEHÍCULOS.**

## INTRODUCCIÓN

El parque móvil en 10 años pasará de 775 millones de vehículos a 1.100 millones circulando por nuestro planeta (lo que supone un incremento del 2,4 % de demanda de energía primaria hasta el 2020). El sector del transporte por carretera es uno de los que más contamina en términos de emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea (UE), con el objeto de reducir las emisiones de este sector el Reglamento (CE) 443/2009 fija unos límites relativos a los turismos nuevos. (130 g de CO<sub>2</sub>/km a partir del año 2012, a partir del año 2020 dicho nivel se reducirá a 95 g de CO<sub>2</sub>/km (**European Commission, 2013 (1)**)).

Para el 2020, si se consideran porcentajes, la UE se ha comprometido a reducir sus emisiones un 20% por debajo de los niveles de 1990, y para el año 2050, la UE tiene el objetivo de reducir dichas emisiones en un 80-95% en comparación con los niveles de 1990 (**European Commission, 2013 (2)**). Pero esta descarbonización podría requerir el 95% de la descarbonización del sector del transporte por carretera (**ROADMAP 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, 2010**). Se ha planteado el cambio del combustible convencional por la electrificación, la biomasa y/o el hidrógeno para que este objetivo sea viable para el año 2050 en todos los sectores de demanda energética: transporte, industria y edificación.

La Comisión Europea en su Libro Blanco del Transporte (**White Paper, 2011**) establece el objetivo de desarrollar un sistema de transporte competitivo y eficiente eliminando las emisiones de carbono y reduciendo la dependencia de los combustibles importados. El cambio hacia vehículos energéticamente eficientes y que utilicen sistemas de propulsión alternativos permitirá conseguir varios de los objetivos de la UE: reducir emisiones y mejorar la calidad del aire, eliminar la emisión de CO<sub>2</sub> y prevenir el cambio climático, mantener seguridad energética e incrementar el uso de energías renovables.

Otro objetivo de la UE es que el consumo de energía renovables (tales como eólica, solar y biomasa) alcance un 20% en el año 2020 (**European Commission, 2013 (2)**). Los vehículos eléctricos (de batería (BEVs), de pila de combustible (FCEVs) y los híbridos enchufables (PHEVs)) son necesarios para alcanzar la reducción global de CO<sub>2</sub> establecida por la UE.

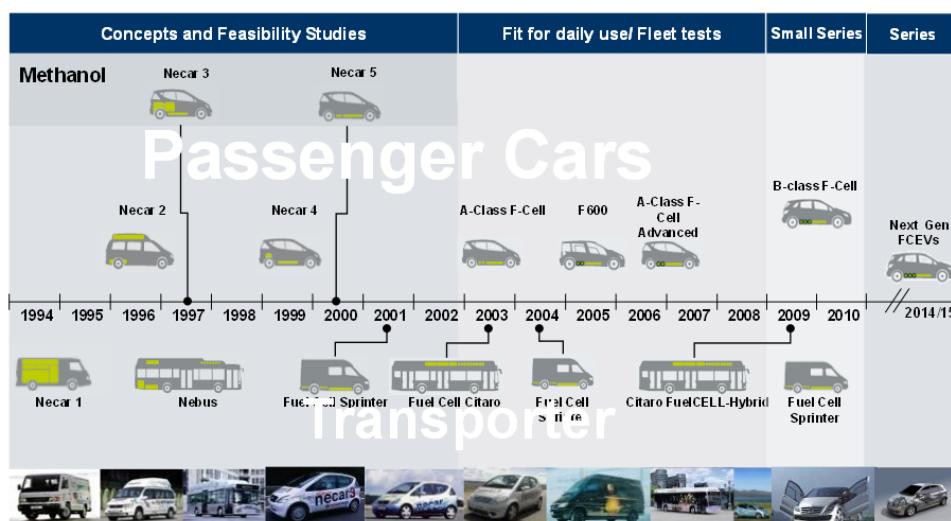
Por otro lado, el plan de acción de la Unión Europea para el fomento de los combustibles alternativos y los biocarburantes en el transporte por carretera concentra sus medidas y acciones en la promoción de las tres opciones: biocarburantes, gas natural, e hidrógeno y pilas de combustible. Esta combinación, según la Comisión Europea permitirá sustituir el 20% de todos los combustibles tradicionales utilizados en el sector del transporte por carretera en Europa (**Ciemat, 2013**).

Los vehículos de pila de combustible (FCVs) tienen la propiedad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases que contribuyen al cambio climático. Por este motivo este trabajo fin de máster tiene como objeto analizar si un vehículo que utiliza como combustible H<sub>2</sub> es energéticamente rentable y eficiente con el estado actual de la tecnología.

## 1. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (1992-2012).

Con objeto de llevar a cabo un análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible durante los últimos 20 años, se ha elaborado una tabla que contiene un total de 262 vehículos (ver DVD adjunto: “*Tabla de vehículos de pila de combustible(1992-2012)*”). Una vez analizados los distintos fabricantes se observa que Daimler, General Motors, Honda, Hyundai y Toyota son los fabricantes que han desarrollado más prototipos y por lo tanto se va a poder estudiar mejor la evolución de sus vehículos.

La compañía **Daimler AG** (a partir de 1925 Mercedes-Benz) ha desarrollado 25 vehículos de pila de combustible en el período analizado. De estos 25 vehículos se han analizado 23 agrupándolos en turismos y en furgonetas. Y dentro de los turismos se han comparado aquellos que son de la misma categoría. Se ha analizado la evolución del vehículo de pila de combustible de este fabricante (*Fig.1*).



*Fig.1.Evolución del vehículo de pila de combustible de Mercedes-Benz. Fuente: Daimler AG, 2013.*

A continuación se analiza la evolución de la serie F-Cell, en la que se pueden encontrar dos versiones: la clase A Fuel Cell que es la primera que aparece en el año 2002 y la clase B Fuel Cell cuyo último desarrollo es en el año 2009. Analizando las dos versiones se observa lo siguiente (Ver *Fig.4 de ANEXO I*):

- La pila de combustible aumenta su potencia un 18% en 7 años (pasa de 85 kW en la clase A a 100 kW en la clase B).
- La autonomía se incrementa de 150 km a 400 km. Esta mejoría de autonomía se debe a que la clase B dispone de más espacio para los depósitos de H<sub>2</sub> comprimido, así como a los avances de la tecnología de la pila de combustible y de las baterías.

- La velocidad máxima que puede alcanzar ha pasado de 145 km/h a 170 km/h (se ha incrementado un 17%).
- En cuanto al almacenaje del hidrógeno, en la clase A se almacenaba como hidrógeno comprimido a 350 bar y en la clase B aumenta la presión, ya que se almacena a 700 bar.
- La eficiencia del vehículo ha aumentado de 56 mpg<sub>equiv</sub><sup>\*</sup> (90,1 km/kg de hidrógeno, es decir, 1,11 kg H<sub>2</sub>/100 km) a 0,97 kg H<sub>2</sub>/100 km.  
*(mpg milla por galón, hay que tener en cuenta que 1 kilogramo de hidrógeno energéticamente equivale a 1 galón de gasolina (Fuente: US Department of Energy, 2013), por lo tanto 56 mpg es lo mismo que 56 millas por kilogramo de hidrógeno, y convirtiendo las millas a kilómetros, 56 mpg es equivalente a 90,1 kilómetros/ kilogramo de hidrógeno).*

\*mpg<sub>equiv</sub>: mpg gas equivalente está basado en la equivalencia energética: 1 kg. Hidrógeno= 1 galón de gasolina.

En el ANEXO I se analiza también la evolución de distintos tipos de vehículos de pila de combustible de Mercedes Benz. Por ejemplo se analiza la evolución de las furgonetas de pila de combustible de este fabricante (ANEXO I: pág. 2 y pág. 3), la evolución de los vehículos llamados “prototipos experimentales” (ANEXO I: pág. 5) y la comparativa de todos los NECAR (New Electric Car) que ha fabricado Mercedes (ANEXO I: pág. 6).

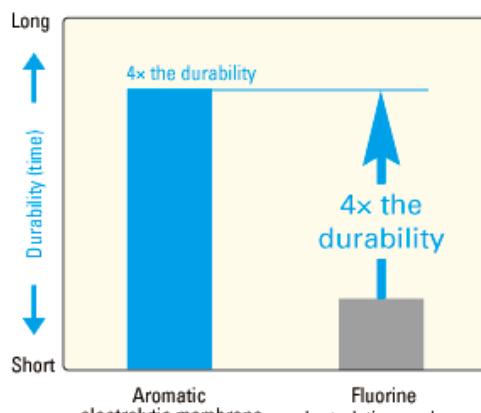
Del fabricante **GM** se han recogido un total de 21 vehículos de pila de combustible, se puede observar que muchos de ellos se desarrollan a partir de la mono-volumen Opel Zafira. En la Fig.8 del ANEXO I se analiza la evolución de distintos vehículos de GM, en la que se puede observar que aumenta un 88% la potencia (kW) de la pila de combustible y que la velocidad máxima se ha incrementado (alcanzando los 160 km/h).

Dentro del fabricante GM también se encuentran el Chevrolet Equinox (2006) el cual tiene una autonomía de 320 km alcanzando una velocidad máxima de 161 km/h, y el Hydrogen4 que es la versión europea del anterior.

**Honda** ha desarrollado 14 vehículos de pila de combustible en el período analizado. Es el fabricante que obtiene la primera certificación para un vehículo de pila de combustible de la Environmental Protection Agency (EPA) y de la California Air Resources Board (CARB) en EE.UU; que obtiene el primer leasing de un vehículo de pila de combustible (2002); y el primero en entregar un vehículo de pila de combustible a un cliente particular (2008) (Fuente:**Honda, 2013(1)**).

En el ANEXO I se ha analizado la evolución de los vehículos Honda FCX (Fuel Cell eXperimental), dicha familia comienza con el lanzamiento del primer prototipo en 1999. La pila de combustible de Honda ha ido mejorando la eficiencia de generación de electricidad y se ha reducido su tamaño, de manera que la nueva pila tiene el doble de densidad (kW/kg) y la mitad de tamaño que su predecesora. Además esta pila de combustible permite operar a temperaturas comprendidas entre -20°C y 95°C, y mejora la durabilidad (Fig.11 y Fig.12 de ANEXO I).

Con la nueva pila de combustible (con membrana electrolítica aromática) se consigue mejorar la durabilidad a elevadas temperaturas, con las pilas convencionales no podían operar a dichas temperaturas ya que los materiales de la membrana no lo soportaban (*Fig.2*).



*Fig.2. Mejora de la durabilidad a elevadas temperaturas (80°C). Fuente: Honda, 2013 (2).*

El FCX Clarity reduce el tamaño y peso del sistema de propulsión con respecto al modelo anterior FCX (2005). Por otro lado, el tamaño de la pila de combustible se ha reducido, alcanzando una potencia máxima de 100 kW. La densidad volumétrica de la nueva pila de combustible es un 50% mayor y la densidad de peso un 67% mayor, por lo que es más ligera y más compacta (**Matsunaga M. et al. (2009)**).

Este vehículo alcanza un rendimiento del 60% (LA-4 MODE), rendimiento tres veces mayor que un vehículo de gasolina y más de dos veces mayor que un vehículo híbrido (*Ver explicación de LA-4 MODE en pág. 17 del ANEXO I*). Este vehículo puede recorrer 115,2 km/kg de H<sub>2</sub>, lo que corresponde a una distancia 2,1 veces mayor que la que puede recorrer un vehículo de gasolina (**Matsunaga M. et al. (2009)**). Ha alcanzado una autonomía de 570 km y el rango de temperaturas a las que puede arrancar es más amplio que en el caso su modelo anterior, pudiendo arrancar a -30°C.

**Hyundai** ha desarrollado 12 vehículos de pila de combustible, para el análisis se han descartado tres por tratarse de vehículos que están en la fase de estudio de diseño. La tercera generación de FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles) de Hyundai es el ix35, con este modelo Hyundai aumenta la autonomía más del 50% y la eficiencia más del 15%. La producción en serie de este vehículo comenzó en la planta de fabricación de Ulsan, Corea, en diciembre del año 2012, convirtiendo así a Hyundai en el primer fabricante de automóviles en iniciar la producción comercial de un vehículo impulsado por hidrógeno (Fuente: **Hyundai**). Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos ix35 Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.

De la marca **Toyota** se han analizado 18 vehículos de pila de combustible. En el ANEXO I se analiza la evolución del FCVH (*Fuel Cell Vehicle Hybrid*) (2002) al FCVH-adv (2008), y se observa que lo que más se incrementa es la autonomía, ya que la velocidad máxima alcanzada y la potencia en este período permanecen constantes.

Es necesario destacar, que lo que más ha dificultado el análisis y comparación de los datos contenidos en la tabla de vehículos (DVD adjunto: “*Tabla de vehículos de pila de combustible (1992-2012)*”) es el hecho de que hay datos de fabricantes referentes a la economía del combustible y a la autonomía, en los que no se detalla en qué condiciones se han obtenido, es decir, qué tipo de conducción se ha llevado a cabo para obtener estos resultados. Este dato es importante, ya que en función el tipo de conducción y las condiciones en las que se ha llevado a cabo, la economía del combustible y la autonomía del vehículo varían. En concreto, la distancia de recorrido real variará en función de los hábitos de conducción y del mantenimiento del vehículo.

En la *Tabla 1* se presenta un resumen del estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible, mostrando el estado en el que se encuentran actualmente 6 vehículos de los fabricantes que más vehículos de pila de combustible han desarrollado. En dicha tabla aparece el concepto NEDC (New European Driving Cycle), se trata de una prueba consistente en un ciclo de conducción para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles. En el *ANEXO I* (pág. 28) se explica brevemente en qué consiste esta prueba.

*Nota: El trabajo completo para la elaboración de este capítulo se puede consultar en el ANEXO I.*

## **ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE**

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética

*Tabla 1. Estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.*

						
ante ulo	Daimler AG	General Motors	General Motors	Honda	Hyundai	Toyota
	<b>Mercedes clase B Fuel Cell</b>	<b>HydroGen4</b>	<b>FCX Clarity</b>	<b>ix35</b>	<b>FCV-adv</b>	
0.97 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(4)</sup> (NECO)	2009	2004.	2007	2007	2012	2008
116,4 MJ/100 km	100 kW	94 kW	100 kW	100 kW	100 kW	90 kW
~400 Km <sup>(2)</sup>	~400 Km	400 Km	~1 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(14)</sup>	0,95 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(14)</sup>	0,71 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(15)</sup> (japonesse 10-15 test cycle)	0,79 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(15)</sup> (japonesse 10-15 test cycle)
170 km/h <sup>(4)</sup>	170 km/h	160 km/h	160 km/h	160 km/h	114 MJ/100 km	85,2 MJ/100 km (japonesse 10-15 test cycle)
			190,8 MJ/100 km <sup>(12)</sup> (EPA)	124,30 MJ/100 km <sup>(12)</sup> (EPA)	114 MJ/100 km	94,8 MJ/100 km <sup>(15)</sup> (japonesse 10-15 test cycle)
<b>ante Pila</b>	<b>Ballard</b>	<b>GM</b>	<b>GM (cuarta generación)</b>	<b>Honda (V flow FC Stack)</b>	<b>HMC (Hyundai Motor Company)</b>	<b>Toyota</b>
<b>en Pila</b>						
<b>á SN</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
<b>sito (capacidad)</b>	Plan de alquiler: 2 años: \$49 \$/mes pagando 2.000 \$ a la firma <sup>(1)</sup> 3,7 kg <sup>(14)</sup> . 1 cilindro pequeño, volumen interior de 18,4 litros y exterior de 31 litros. 2 cilindros más grandes: 37,3 litros de volumen interior y 62 litros de volumen exterior cada uno. Una suma de espacio mucho mayor que la de un depósito tradicional de combustible de capacidad similar (unos 35 litros).	Plan de alquiler: 2 años: \$49 \$/mes pagando 2.000 \$ a la firma <sup>(1)</sup> No consta	No consta	171 litros 1 depósito, 3,92 kg <sup>(12)</sup>	2 depósitos, 5,64 kg (en total)	156 litros <sup>(16)</sup> 6 kg
<b>tos e</b>	Primer vehículo comercializado en serie utilizando hidrógeno como combustible (2010).	Disponible desde el verano de 2008 para uso del consumidor. Pequeña escala de producción de 200 vehículos entre 2008-2010. Leasing en el sur de California y en Japón <sup>(6)</sup> . Se prevé su venta en Europa en 2015 <sup>(10)</sup> .	Proyecto Driveaway. Este fabricante tiene la mayor flota de vehículos de hidrógeno del mundo, 119 vehículos.	Generador del premio FutureAuto 2013. Arranca a -25°C. Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie iniciada a finales de 2015.	Obligado a la certificación del Ministerio Japonés de Territorio, Infraestructuras y Transporte el 3 de junio de 2008. Opera a inclinaciones de -30°C.	
<b>ustible</b>	<b>Hidrógeno comprimido 70 MPa</b>	<b>Hidrógeno líquido</b>	<b>Hidrógeno comprimido 70 MPa</b>	<b>Hidrógeno comprimido 35 MPa</b>	<b>Hidrógeno comprimido 70 MPa</b>	<b>Hidrógeno comprimido 70 MPa</b>
<b>Bruto</b>	1809 kg <sup>(1)</sup>	1590 kg <sup>(7)</sup>	1625 kg <sup>(9)</sup>	1830 kg <sup>(14)</sup>	1880 kg <sup>(16)</sup>	1980 kg <sup>(14)</sup>

(1) Mercedes-Benz, 2013 (2) http://ib99s.km77.com/teletransporte/5094/mercedes-benz-clase-b-f-temaria-y-graticos/

(3) Honda, 2013 (4) http://www.biogenergasosible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/

(5) Honda, 2013 (6) http://www.biogenergasosible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/

(11) Matsunaga M. et al. (2009). Analysis of vehicle emissions from electric vehicles. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 15(1), 1-10.

(12) Honda 2013. (7) <http://www.honda.com/japan/acsx/fcx-clarity/specifications.aspx>

(13) Mercedes-Benz 2013. (4) <http://www.mbusa.com/models/benz/electric-car.html>

(14) Mercedes-Benz 2013. (3) <http://www.daimler.com/docomos/mercedesbenz-e.html>

(15) Toyota 2013. (3) <http://www.toyota.com/cars/prius/>

(c) Mercedes-Benz 2013 (5), [http://www.mbusa.com/com/BMDigitalAssets/pdf/mbusa/mbus/mbus\\_electrification.pdf](http://www.mbusa.com/com/BMDigitalAssets/pdf/mbusa/mbus/mbus_electrification.pdf)

(14) Hyundai 2013, (3) [http://media.librabit.es/content/S0120/3/doc/notas\\_prensa\\_a\\_noymarcas/hyundai/doc\\_ix65\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.librabit.es/content/S0120/3/doc/notas_prensa_a_noymarcas/hyundai/doc_ix65_fuel_cell_es.pdf)

Tabla 1. Estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.

<b>Fabricante</b>	Daimler AG	General Motors	General Motors	Honda	Hyundai	Toyota
<b>Vehículo</b>	<b>Mercedes clase B Fuel Cell</b>	<b>HydroGen3 liquid</b>	<b>HydroGen4</b>	<b>FCX Clarity</b>	<b>ix35</b>	<b>FCHV-adv</b>
<b>Año</b>	2009	2004	2007	2007	2012	2008
<b>P(kW)</b>	100 kW	94 kW	93 kW	100 kW	100 kW	90 kW
<b>Consumo (kg H<sub>2</sub>/100 km)</b>	0,97 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(4)</sup> (NECD)	No consta	1,59 kg H <sub>2</sub> /100 km (39 mpg o 17 km/l <sup>(6)</sup> )	~1 kg H <sub>2</sub> /100 km	0,95 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(14)</sup>	0,71 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(15)</sup> (Japanese 10-15 test cycle) 0,79 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(15)</sup> (Japanese JC08 test cycle)
<b>Consumo (MJ/100 km)</b>	116,4 MJ/100 km	No consta	190,8 MJ/100 km	124,30 MJ/100 km <sup>(12)</sup> (EPA)	114 MJ/100 km	85,2 MJ/100 km (Japanese 10-15 test cycle) MJ/100 km <sup>(15)</sup> (Japanese JC08 test cycle) 94,8
<b>Autonomía</b>	~400 km <sup>(2)</sup>	400 km	320 km	570 km	594 km	830 km <sup>(15)</sup> (Japanese 10-15 test cycle)
<b>Velocidad máxima</b>	170 km/h <sup>(4)</sup>	160 km/h	160 km/h	160 km/h	160 km/h	155 km/h
<b>Fabricante Pila</b>	Ballard	GM	GM (cuarta generación)	Honda (V flow FC Stack)	HMC (Hyundai Motor Company)	Toyota
<b>Volumen Pila</b>		0,94 kW/kg (potencia específica) <sup>(7)</sup> 1,60 kW/l (densidad de potencia) <sup>(7)</sup>	No consta	1,5 kW/kg (potencia específica) <sup>(11)</sup> 1,90 kW/l (densidad de potencia) <sup>(11)</sup> Volumen: 57 l <sup>(12)</sup> Peso: 67,13 kg <sup>(12)</sup>	1,65 kW/l (densidad de potencia) <sup>(13)</sup>	45,359 kg (100 libras) <sup>(16)</sup>
<b>Batería S/N</b>	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Precio</b>	Plan de alquiler: 2 años :849 \$/mes pagando 2.000 \$ a la firma <sup>(3)</sup>	No consta	No consta	Plan de alquiler: 3 años a 600 \$/mes (comercializado mediante leasing 21.600 \$) <sup>(10)</sup>	125.000 €	Plan de alquiler: 30 meses a 1.050.000 yen/mes <sup>(17)</sup>
<b>Depósito (capacidad)</b>	3,7 kg <sup>(1)(4)</sup> . 1 cilindro pequeño: volumen interior de 19,4 litros y exterior de 31 litros. 2 cilindros más grandes: 37,3 litros de volumen interior y 62 litros de volumen exterior cada uno. (Una suma de espacio mucho mayor que la de un depósito tradicional de combustible de capacidad similar (unos 35 litros))	4,6 kg (68 litros)	4,2 kg	171 litros 1 depósito, 3,92 kg <sup>(12)</sup>	2 depósitos, 5,64 kg (en total)	156 litros <sup>(16)</sup> 6 kg
<b>Aspectos especiales</b>	Primer vehículo comercializado en serie utilizando hidrógeno como combustible (2010).	En el maratón de pila de combustible que tuvo lugar en el verano del año 2004, recorrió 9,696 kilómetros a través de 14 países europeos sin problemas. En abril de 2005 ganó el rally de Monte Carlo para vehículos de pila de combustible <sup>(5)</sup> .	Proyecto Driveway. Este fabricante tiene la mayor flota de vehículos de hidrógeno del mundo, 119 vehículos.	Disponible desde el verano de 2008 para uso del consumidor. Pequeña escala de producción de 200 vehículos entre 2008-2010. Leasing en el sur de California y en Japón <sup>(8)</sup> . Se prevé su venta en Europa en 2015 <sup>(10)</sup> .	Ganador del premio FuturAuto 2013. Arranca a -25 °C. Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos ix35 Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.	Obtuvo la certificación del Ministerio japonés de Territorio, Infraestructuras y Transporte el 3 de junio de 2008. Opera a incluso a -30 °C.
<b>Combustible</b>	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Hidrógeno líquido	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Hidrógeno comprimido 35 MPa	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Hidrógeno comprimido 70 MPa
<b>Peso</b>	1809 kg <sup>(1)</sup>	1590 kg <sup>(7)</sup>		1625 kg <sup>(9)</sup>	1830 kg <sup>(14)</sup>	1880 kg <sup>(16)</sup>
<b>Peso Bruto</b>	2084 kg <sup>(1)</sup>				1980 kg <sup>(14)</sup>	

(1) Mercedes-Benz, 2013 (2). <http://blogs.km77.com/teletransporte/5994/mercedes-benz-clase-b-f-cell-tecnica-y-graficos/>

(2) Mercedes-Benz, 2013 (3). <https://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1401156-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html>

(3) Mercedes-Benz, 2013 (4). [http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric\\_car](http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric_car)

(4) Mercedes-Benz, 2013 (5). <http://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/pdfmb/green/f-cell.pdf>

(5) GM 2013, (1). [http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/genova\\_2006/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/genova_2006/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)

(6) Noriko Hikosaka Behling, Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs

(7) GM 2013, (2). Gregory Hoogers. Fuel Cell Technology Handbook

(8) GM 2013, (3). 2010 Fuel Cell Technologies market report. Junio 2011. U.S. Department of energy. Energy Efficiency & Renewable Energy

(9) Honda 2013, (5). Flamberg S. et al. (2010). Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. DOT HS 811 267.NHTSA

(10) Honda 2013, (6). <http://www.blogenergiasostenible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/>

(11) Matsunaga M. et al. (2009) (Análisis tabla vehículos)

(12) Honda 2013, (7). <http://automobiles.honda.com/spanish/fcx-clarity/specifications.aspx>

(13) Hyundai 2013, (2). [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)

(14) Hyundai 2013, (3). [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_nov\\_marcas/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_nov_marcas/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)

(15) Toyota 2013, (4). [http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota\\_NHA\\_keynote\\_2010.pdf](http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota_NHA_keynote_2010.pdf)

(16) Toyota 2013, (5). [https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/fchv\\_adv\\_erg.pdf](https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/fchv_adv_erg.pdf)

(17) Toyota 2013, (6). [http://pressroom.toyota.com/article\\_display.cfm?article\\_id=2388](http://pressroom.toyota.com/article_display.cfm?article_id=2388) (Toyota FCVH Fact Sheet)

## 2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.

Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los vehículos de pila de combustible (FCVs) teniendo en cuenta aspectos medioambientales y económicos.

La bibliografía existente sobre pilas de combustibles cubre áreas como los **mecanismos y el funcionamiento de la pila de combustible, análisis comparativo entre las pilas de combustible y otras fuentes de energía, el impacto medioambiental de los vehículos de pila de combustible, análisis económicos que justifican o desacreditan a los vehículos de pila de combustible, e incluso análisis sobre la influencia que tiene sobre la salud de las personas.**

Los artículos científicos y estudios analizados se han agrupado por temática (aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible, Impacto Ambiental de los FCVs, Impacto Económico de los FCVs) y ordenados por antigüedad (Ver *Tabla 1 de ANEXO II*). A continuación se resumen los aspectos más importantes.

### 2.1. Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible.

**Guvelioglu et al. (2005)** investigaron el contenido de agua en la membrana de la pila de combustible e identificaron las condiciones en las que la membrana se deshidrata. También evaluaron como influyen las dimensiones de la pila (anchura del canal y dimensiones de la placa bipolar), la porosidad de los electrodos y la humedad relativa de los flujos que entran a la pila, sobre el rendimiento de la pila de combustible. Se obtuvo como resultado que el canal y las placas bipolares deben ser más estrechos cuando la corriente tiene una elevada densidad. Por otro lado, la humedad relativa de la corriente de gas del ánodo influye más sobre el rendimiento de la pila de combustible que la humedad relativa del gas del cátodo.

Otros estudios como el llevado a cabo por **Cai Mei et al. (2006)** analizaron cómo influyen los procesos de degradación, tales como la corrosión de carbono y la pérdida del área superficial del Platino (Pt) sobre la pila de combustible. Llegaron a la conclusión de que la corrosión del carbono y la pérdida superficial de platino pueden simularse mediante pruebas a temperatura elevada (250°C). Concluyendo que cuando se da una pérdida de área superficial de platino se produce una gran corrosión de carbono.

La degradación de la pila de combustible también fue estudiada por **Borup et al. (2007)**, analizándose la durabilidad, una de las principales barreras de las pilas de combustible PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Pilas de membrana). Pero al analizar la durabilidad también hay que analizar el coste, ya que están relacionados. Varios estudios muestran que hay factores que pueden reducir la vida útil de las PEMFC, incluyendo la disolución de partículas de platino y la sinterización, la corrosión

con carbono, y el adelgazamiento de la membrana. Por otro lado, se concluye que las condiciones bajo las cuales opera una pila de combustible o a las que se expone influyen sobre su rendimiento y vida útil. Otros estudios llevados a cabo sobre la degradación de las PEMFC revelaron la degradación de ciertos materiales que antes se consideraban inmunes a la corrosión y descomposición, tales como el platino (metal del catalizador), el ionómero conductor de protones (utilizado en la membrana y en la capa del catalizador), el carbón/grafito (utilizado en el soporte del catalizador, en la capa de difusión del gas (GDL) y en la placa bipolar) y el Teflón (utilizado en la GDL).

Posteriormente **Wu Jinfeng et al. (2008)** llevaron a cabo una revisión de las distintas publicaciones sobre degradación de las PEMFC. La durabilidad, el coste y la fiabilidad de las PEMFC están retrasando su comercialización. La durabilidad es una de las características más importantes para que las PEFC sean viables e influye sobre los otros dos aspectos comentados. Concluyen que hay una falta de información sobre la correlación entre la degradación de los componentes individuales y la pérdida de rendimiento. Con respecto a la durabilidad de la membrana este estudio concluye que mediante la modificación de su estructura se pueden mejorar su estabilidad química/electroquímica utilizando politetrafluoroetileno para reforzar la membrana y así mejorar su estabilidad mecánica. Por otro lado, los catalizadores utilizados se deterioran y no cumplen los objetivos establecidos por el DOE (Departamento de Energía de los EE.UU.). También se debe reducir la disolución de Pt y la corrosión del carbono, este estudio sugiere utilizar catalizadores de aleación de Pt con una alta resistencia a la oxidación electroquímica.

Los objetivos establecidos por el DOE para el desarrollo de las pilas PEMFC son que para el año 2015 las PEMFC en los vehículos deben tener una eficiencia del 60% y un coste de 30 US\$/kW (unos 23,28 €/kW), además se espera que tengan una vida útil de al menos 5.000 h, que es equivalente a 241.402 km (150.000 millas) circulando a 48,28 km/h (30millas/h).

El arranque en frío es un aspecto fundamental para la comercialización de las PEMFCs para aplicaciones en la automoción. Por este motivo, un aspecto a tener en cuenta en el desarrollo de las pilas de combustible es que la formación de hielo/escarcha en una PEMFC que opera a bajo cero puede provocar el apagado durante el arranque. Por este motivo, **Pinton et al. (2009)** llevaron a cabo ensayos isotérmicos en células individuales en distintas condiciones con el objeto de investigar el comportamiento del “arranque en frío”. Obtuvieron entre otras, las siguientes conclusiones:

- Existe un nivel óptimo de humedad del núcleo de la pila de combustible para el cuál el calor acumulado generado por la reacción electroquímica es máximo.
- El fallo del funcionamiento de la pila de combustible puede ser debido a la formación de hielo en los poros de la capa del cátodo (dificulta el transporte de oxígeno) y a la formación de hielo en lugares activos de la reacción que incrementan la resistencia térmica.

Siguiendo en la línea de los problemas que presentan las pilas de combustible en el arranque en frío, **Hiramitsu Y. et al. (2010)** comprobaron la eficacia de un ionómero

como portador de oxígeno para mejorar el arranque en frío de pilas de combustible PEMFCs. Obtuvieron como resultado que el comportamiento en arranque en frío y la durabilidad mejoraron significativamente al aumentar el contenido de ionómero en la capa del catalizador debido a la mayor permeabilidad del oxígeno que se consigue mediante el hielo formado en la capa del catalizador.

Ese mismo año, **Jiao Kui et al. (2010)** también llegaron a la conclusión de que el espesor de la membrana y la fracción volumétrica de ionómero en la capa del catalizador desempeñan un papel fundamental en la reducción de la cantidad de hielo formado. Una membrana más gruesa conlleva a una mayor capacidad de absorción de agua pero con un proceso de absorción más lento, y el aumento de la fracción volumétrica del ionómero aumenta la capacidad de absorción de agua del ionómero y mejora la absorción de agua que tiene la membrana. Arrancar la pila a voltaje constante (“potentiostatic condition”) es mejor que arrancarla a corriente constante (“galvanostatic condition”).

Estudios anteriores al llevado a cabo por **Wu Jinfeng et al. (2010)** han mostrado que tanto el sustrato como la capa microporosa de la capa de difusión del gas (GDL, Gas Diffusion Layer) afectan sobre el balance del agua y el rendimiento de una PEMFC. **Wu Jinfeng et al. (2010)** analizaron la degradación de una GDL bajo unas condiciones de elevada temperatura y elevado caudal de flujo. Los resultados que obtuvieron fueron que la pérdida del material juega un papel muy importante en los mecanismos de degradación de la GDL, mientras que una tensión excesiva antes de la degradación debilita la estructura de la GDL y cambia su propiedad física, lo que acelera la pérdida de material del GDL durante el envejecimiento.

En el estudio llevado a cabo por **Zhili Miao et al. (2010)** se presentó una nueva estrategia para mejorar el rendimiento del arranque en frío de las PEMFCs a temperaturas bajo cero. Para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua se añade un nano-óxido hidrófilo, como puede ser el SiO<sub>2</sub>, a la capa del catalizador del cátodo. Aunque en condiciones normales de operación, el rendimiento de la pila con SiO<sub>2</sub> no es tan bueno como en el caso que no lleva esta capa, las pruebas de arranque en frío muestran que añadiendo SiO<sub>2</sub> la pila es capaz de arrancar y funcionar incluso a 100 mA/cm<sup>2</sup> y -8°C durante 25 minutos, mientras que en el caso de la pila sin SiO<sub>2</sub> el voltaje cae al momento de arrancar en frío. Por lo que se concluye que el proceso de arranque en frío depende de la capacidad de almacenamiento de agua que tiene el cátodo.

**Veziroglu Ayfer et al. (2011)** afirmaron que para las aplicaciones de vehículos las pilas de combustible más apropiadas son las de membrana de intercambio de protones (PEM o PEMFC). Aunque se sigue investigando para obtener los puntos óptimos de operación y el control automático para que las pilas de combustible arranquen en frío en condiciones de baja temperatura y para mejorar otras características de operación. La degradación y la durabilidad parece que van a ser unos aspectos críticos para el uso práctico de las pilas de combustible. El análisis del proceso específico por el cuál una pila de combustible se degrada en un vehículo con el paso del tiempo abre un nuevo campo de investigación.

## 2.2. Impacto ambiental de los FCVs.

La investigación sobre el **impacto ambiental** de los FCVs es un tema de interés. La mayoría de los estudios comparan las emisiones de la cadena de producción de hidrógeno con las emisiones de la cadena de producción de un combustible fósil. La reducción de emisiones es una ventaja de los FCVs sobre las tecnologías basadas en combustible fósil.

**Colella et al. (2005)** en su estudio analiza las emisiones al sustituir la flota de vehículos de combustible fósil por vehículos eléctricos híbridos y por FCVs. Los resultados que obtienen son:

- Esta sustitución reduce considerablemente la emisión de contaminantes debido a la eliminación de los productos de la combustión, se reducen incluso las cantidades netas de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), de volátiles orgánicos compuestos (COV), de partículas, de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y de monóxido de carbono (CO).
- Se reduce el impacto del calentamiento global por los gases de efecto invernadero y partículas.
- En el caso de que los FCVs se alimenten con combustibles fósiles como el gas natural, todavía reduce el 14% de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , respecto a los vehículos de combustibles fósiles.

El informe llevado a cabo por **McKinsey & Company (2011)** concluye que la instalación de una infraestructura de hidrógeno está justificada y es factible, con una inversión inicial en infraestructura relativamente bajo. También concluye que los vehículos eléctricos de pilas de combustible y de baterías tendrán un coste competitivo con los vehículos de motor de combustión interna en el año 2025 y a partir de 2020 si se aplican incentivos fiscales.

Concluye lo siguiente sobre los FCVs actuales:

- Han reducido las pérdidas de calor y el calor remanente se utiliza para el control climático del vehículo.
- Los prototipos han demostrado que se puede mantener un nivel de humedad adecuado en las membranas sin necesidad de un humidificador externo.
- Los ensayos de actuaciones en bajas temperaturas han demostrado que el arranque en frío y las actuaciones de conducción son equivalentes a las de los MCI.
- La eficiencia neta de los “stacks” ha alcanzado el 59%, con mejoras adicionales que llevan a un menor tamaño y un coste más bajo.
- Los ensayos de durabilidad han demostrado que se puede mantener una eficiencia aceptable del “stack” durante el tiempo de vida del vehículo.
- La innovación en materiales permite almacenar  $\text{H}_2$  a 700 bar lo que incrementa la autonomía aproximándose a la de los MCI.

- El rango de voltaje del “stack” ha mejorado. Con las baterías suministrando potencia pico adicional se ha incrementado la durabilidad y eficiencia del stack.
- Los sistemas actuales de pilas de combustible se integran en el vehículo sin comprometer el volumen de carga ni el peso del vehículo.
- En cuanto al coste de los materiales, hacia el año 2020 se alcanzarán costes aceptables mediante simplificaciones del diseño, reducción del uso de materiales, tecnologías de producción y economías de escala.

### 2.3. Análisis económico de los FCVs.

Por otro lado el análisis ambiental puede venir acompañado de un **análisis económico** para analizar la viabilidad de mercado de los FCVs. Actualmente expertos están analizando la mejor estrategia de comercialización y crecimiento de la economía de los FCVs.

**Eaves S. and Eaves J. (2004)** en su estudio concluyeron que los vehículos eléctricos de batería (BEVs) son más eficientes, limpios y menos caros en términos de coste de fabricación y de coste de repostaje que los FCVs. Los resultados mostraron que utilizando energías renovables, los FCVs necesitan una producción de energía de 2,4 a 2,6 veces mayor que la energía necesaria para un BEV. El sistema de propulsión del FCVs pesa un 43% más que el sistema utilizado en un BEVs, ocupa casi tres veces más de espacio en el vehículo para generar la misma potencia y cuesta aproximadamente un 46% más.

Por otro lado, el estudio llevado a cabo por **Odgen et al. (2004)** comparó el coste social (incluye el coste residual del vehículo, el coste de la energía utilizada, costes de operación y mantenimiento, costes externos del uso del combustible, costes de daños por ruido y emisiones desde contaminantes atmosféricos hasta gases de efecto invernadero, y otros factores) de distintos tipos de vehículos. Y obtuvo como resultado que los FCVs utilizando H<sub>2</sub> derivado de combustibles fósiles con captura de CO<sub>2</sub> tendrán el menor coste social de todos tipos de vehículos.

**Granovskii et al. (2006)** afirmaron que la eficiencia económica y el impacto ambiental del uso de vehículos eléctricos dependen de la fuente que se obtiene la electricidad. Obtuvieron como resultado que la generación de electricidad a bordo desde un sistema de pila de combustible mejorará los resultados económicos y el comportamiento medioambiental de los vehículos eléctricos.

**Ajanovic A. (2008)** concluyó que los FCVs no serán una buena solución hasta el año 2030 debido a que el coste del hidrógeno y de los vehículos de pila de combustible todavía es muy elevado. Este estudio también obtiene como resultado que la mayor parte del coste del hidrógeno se debe a su producción (más del 95%). En Austria, en el año en el que se llevó a cabo el estudio, la forma menos económica de producir hidrógeno a partir de fuentes renovables es la electrólisis con electricidad fotovoltaica. Mientras que la forma más barata de producir hidrógeno renovable es utilizando biomasa (costando 0,11 €/kWh).

Para una capacidad de producción baja de hidrógeno, por electrólisis, la producción in situ es económicamente la mejor solución, porque de esta manera se ahorra el coste del transporte de hidrógeno. Este estudio ha mostrado que el transporte de hidrógeno gaseoso con camiones es efectivo para distancias cortas y pequeñas cantidades de hidrógeno, pero no es competitivo con el transporte de hidrógeno líquido. El transporte por conductos es una solución para el caso del hidrógeno gaseoso pero supone una gran inversión en infraestructura. En este estudio se obtiene que el coste del hidrógeno está entre **0,09 €/kWh y 1,18 €/kWh**.

**Lee JY. et al. (2009)** llevaron a cabo un análisis del coste del ciclo de la vida del hidrógeno que examina los costes del pozo al tanque (“well-to-tank”), los costes del tanque a la rueda (“tank-to-wheel”) y los costes externos de la emisión de gases y del efecto invernadero, e indican que los costes del ciclo de vida del hidrógeno dependen del precio del FCV, de la capacidad de producción, de la eficiencia del combustible, de los costes sociales y de la interacción del hidrógeno. En este estudio concluyen que en el año 2015, se espera que todas las formas de H<sub>2</sub> producido tengan unos costes de ciclo de vida inferiores a los combustibles convencionales. Afirman que el precio del FCV es el factor más importante para impulsar la economía del hidrógeno y de los FCVs. Dicho estudio obtiene como resultado que el hidrógeno obtenido a través del reformado de vapor de agua sería el más viable económicamente ya que se espera que el gas natural sea más barato que el petróleo y también porque emite menos contaminantes. Pero si se tiene en cuenta el coste social, el H<sub>2</sub> obtenido con energía eólica sería el mejor ya que emite menos gases de efecto invernadero y menos contaminantes del aire que otras vías de producción.

**Offer GJ. et al. (2010)** en un estudio más reciente llegaron a la conclusión de que en el año 2030, tanto los BEVs como los vehículos híbridos de pila de combustible “enchufables” tendrán costes de ciclo de vida inferiores que los FCVs.

Por otro lado, **Yongiling Sun et al. (2010)** afirman en su estudio que los gastos necesarios para producir FCVs competitivos con respecto a los vehículos de gasolina son bastante sensibles a las externalidades (efecto negativo o positivo de la producción o consumo de algunos agentes sobre la producción o consumo de otros, por los cuales no se realiza ningún pago o cobro) y al precio futuro de la gasolina.

Según el estudio llevado a cabo por el DOE (**Department of Energy. United States of America, 2011**) concluye que los costes de las pilas de combustible han disminuido considerablemente para el caso de los vehículos ligeros, con una reducción de más del 80% desde el año 2002 y del 30% desde el año 2008. Por otro lado, el contenido de platino se ha reducido en un factor de cinco y en la actualidad contiene menos de 0,2 g/kW (objetivo de DOE: 0,125 g/kW). Y la durabilidad de las pilas de combustible se ha duplicado. El coste por kW de un sistema de pilas de combustible en el sector del transporte se redujo a menos de 50 \$/kW por primera vez en el año 2011.

El coste para producir y distribuir hidrógeno también continúa disminuyendo. Para la producción distribuida, el coste de hidrógeno (distribuido y libre de impuestos) obtenido a partir de reformado de gas natural ya está por debajo de 4 \$ por galón de gasolina equivalente, dentro del objetivo establecido por el DOE: 2-4 \$ por galón de gasolina

equivalente. El coste del hidrógeno (distribuido y libre de impuestos) obtenido a partir de electrólisis está en torno a 6 \$ por galón de gasolina equivalente (**Department of Energy. United States of America, 2012**).

Por otro lado, el DOE está tratando de reducir los costes de ciclo de vida de los FCVs a menos de la mitad en 2020 (ver Fig.8 del ANEXOII). Se espera esta reducción de costes aumentando el volumen de fabricación y las mejoras tecnológicas tanto en las pilas de combustible como en la producción y almacenamiento de hidrógeno.

#### 2.4. Estado actual de los FCVs.

La tecnología de las pilas de combustible ha progresado en cuanto a reducción de costes, vida y durabilidad del sistema. Sin embargo, el progreso en lo que se refiere a reducción de costes, tanto de las pilas de combustible como del hidrógeno, debe continuar, y la disponibilidad de estaciones de abastecimiento de hidrógeno debe aumentar, en especial estaciones que proporcionen hidrógeno producido a partir de fuentes renovables. El rendimiento y durabilidad de las pilas en las aplicaciones del transporte también deben mejorarse. Por otro lado, la concienciación de la sociedad con respecto al hidrógeno y las pilas de combustible es baja, por lo que hace falta una mayor divulgación y educación en este campo. Y por último las normas de seguridad y de producción tienen que ser revisadas para reflejar la situación actual.

En la actualidad, todavía no existe a nivel mundial un mercado consolidado del hidrógeno y el desarrollo de FCVs está limitado a prototipos.

Japón y EE.UU. son los que están trabajando en el desarrollo de la tecnología de pilas de combustible, seguido de Europa. En concreto, España participa en distintos proyectos europeos de demostración relacionados con el hidrógeno y en los últimos años se ha producido un importante impulso promovido por la AeH<sub>2</sub> y la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y las Pilas de Combustible (PTEHPC).

Las perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno se detallan a continuación:

- Se espera que hasta el año 2030, los combustibles fósiles (combinados con técnicas de captura y almacenamiento de carbono) sigan siendo la fuente de energía dominante para la producción del hidrógeno en Europa. Hasta entonces, el H<sub>2</sub> obtenido a partir de fuentes renovables irá penetrando poco a poco en el mercado.
- El suministro de H<sub>2</sub> probablemente incluya tanto su aprovisionamiento en grandes centrales de suministro como la obtención local en los puntos de consumo.
- La introducción de los FCVs depende en gran medida de la reducción del coste del sistema de propulsión y en menor medida del precio de producción, de la distribución y del coste de almacenamiento del H<sub>2</sub>.
- Los incentivos sociopolíticos de cada país también ayudarán a introducir el hidrógeno.

### 3. FÁCTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.

En este capítulo se definen aquellos parámetros relevantes a tener en cuenta para comparar la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos que utilizan H<sub>2</sub> como combustible frente a vehículos alimentados por otro tipo de combustible.

En los FCVs la principal diferencia con los vehículos convencionales es la pila de células de combustible que convierte el hidrógeno almacenado a bordo con oxígeno del aire en electricidad para hacer funcionar el motor eléctrico que propulsa al vehículo.

El Hidrógeno es el elemento más abundante del universo pero es un vector energético, hay que producirlo con el aporte energía. Puede producirse a partir de varios recursos (agua, recursos fósiles, biomasa,...) siguiendo para ello diversos procesos de transformación (electrólisis, gasificación, reformado.). Todos estos procesos de transformación suponen un gasto energético cuyos costes son asumibles (al igual que ocurre con la electricidad) pero a diferencia de la electricidad el hidrógeno es almacenable.

En *Tabla 2* se presentan las principales propiedades del Hidrógeno:

*Tabla 2. Propiedades del Hidrógeno. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).*

Densidad	0,0899 kg/Nm <sup>3</sup> (gas) 0,0708 kg/l (líquido)
Poder calorífico Inferior PCI	120 MJ/kg
Poder calorífico superior PCS	141,86 MJ/kg
Límites de explosión	4-75% (concentración de H <sub>2</sub> en aire)
Límites de detonación	18,3 - 59,0 % (concentración de H <sub>2</sub> en aire)
Capacidad calorífica específica	C <sub>d</sub> = 14,199 KJ/(kg K) C <sub>v</sub> = 10,074 KJ/(kg K)
Coeficiente de difusión	0,61 cm <sup>2</sup> /s

*Tabla 3. Comparativa del Hidrógeno con otros combustibles. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).*

H <sub>2</sub>	Gasolina	Gasóleo	Metano	Gas Natural	Propano	Butano	Metano I
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,40 kg	2,54-3,14 kg <sup>1</sup>	2,59 kg	2,62 kg	6,09 kg
1 litro H <sub>2</sub> líquido	0,268 l	0,236 l					0,431 l
1 litro H <sub>2</sub> (350 bar)	0,0965 l	0,0850 l	0,240 l (350 bar)	0,3-0,35 l (350 bar)	0,117 l (350 bar)	0,127 l (350 bar)	0,191 l

<sup>1</sup> Dependiendo de la composición del Gas Natural.

Puede extrañar que un kilogramo de hidrógeno genere la misma energía que 2,78 kg de gasolina (*Tabla 3*), sin embargo, ese kilogramo de hidrógeno ocupa mucho volumen por lo que la cantidad de energía que aporta por unidad de volumen (su densidad energética) es muy baja. En la *Tabla 3* se muestra una comparativa del hidrógeno con otros combustibles, calculando el valor energético basado en el PCI.

El hidrógeno por tener una densidad de energía baja, debe ser o bien comprimido a muy altas presiones o licuado a muy bajas temperaturas para ser almacenado en un volumen razonable. Técnicamente lo más fácil es comprimirlo a 200-350 bares pero sigue ocupando muchísimo (a una presión de 200 bares, almacenar 4 kg requeriría un depósito de 250 litros), el uso de nuevos materiales (composites de fibras de carbono con polímeros o aluminio) permite almacenarlo a presiones de hasta 700 bares.

Si el Hidrógeno está en estado líquido, ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita mucho frío para alcanzar los 253 °C bajo cero que necesita el hidrógeno para pasar a estado líquido. Por lo que se investigan distintos métodos para almacenar hidrógeno en menos volumen, las dos alternativas existentes hasta la fecha son el almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos y en nanotubos de carbono. De momento algunas marcas han optado por incorporar un reformador que convierte otro combustible que ocupa menos volumen (metanol) en hidrógeno.

*Tabla 4. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno, metano, propano y gasolina. Fuente: Gutiérrez Jodra, Luis , 2005.*

Propiedad	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	Metano (CH <sub>4</sub> )	Propano (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	Gasolina -CH <sub>2</sub> -
Poder calorífico (MJ/kg)	120	50	46,3	44,5
Temperatura de autoignición (°C)	585	540	487	228-501
Temperatura adiabática de la llama en aire (°C)	2.045	1.875	1.925	2.197
Límites de ingnición en aire (% en vol.)	4-75	5,3-15	2,1-10	1,0-7,6
Propagación de la llama en aire (m/s)	2,65	0,4	-	0,4
Coeficiente de difusión en aire (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,18	-	0,05
Toxicidad	no	no	-	Alta a conc> 500 ppm
ΔV en la reacción con oxígeno	negativo	positivo		positivo

En la *Tabla 4* se presenta una comparación entre las propiedades físicas y químicas del hidrógeno y de otros combustibles como son el metano, el propano y la gasolina. El hidrógeno es un buen combustible capaz de proporcionar más energía por unidad

de masa que otro combustible: 33,3 kWh/kg, frente a los 13,9 kWh/kg del gas natural o los 12,4 kWh/kg del petróleo (**Asensio Paloma, "Hidrógeno y Pila de combustible"**).

En la *Tabla 5* se muestra un análisis DAFO sobre el uso del Hidrógeno como combustible.

*Tabla 5 Análisis DAFO sobre el uso del hidrógeno como combustible. Fuente: IDAE, FITSA (2008).*

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se trata de una fuente de energía sino de un vector energético, y como tal hay que consumir cierta energía para fabricarlo.</li> <li>- Su transporte es costoso por tener una baja densidad energética por unidad de volumen y por ser un gas muy volátil.</li> <li>- No existe en la actualidad una infraestructura de suministro de hidrógeno para su uso como vector energético comercial.</li> <li>- El almacenamiento en el vehículo de la cantidad de hidrógeno suficiente para asegurar una autonomía media no está resuelto.</li> <li>- Las pilas de combustible están en fase de desarrollo.</li> <li>- En la actualidad se produce en el mundo una veinteava parte de todo el hidrógeno que sería necesario para sustituir a los combustibles alternativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Que el precio del hidrógeno no llegue a ser competitivo con los combustibles alternativos.</li> <li>- El precio del hidrógeno puede ser muy dependiente del precio del gas natural o de la electricidad renovable.</li> <li>- La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (especialmente el carbón) necesita del desarrollo de nuevas técnicas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero.</li> <li>- Un aumento del precio del platino usado como catalizador de la combinación química del hidrógeno con el oxígeno encarecería considerablemente las pilas de combustible.</li> <li>- Inexistencia de una normativa sobre su uso.</li> </ul>
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se puede producir hidrógeno a partir de múltiples fuentes, incluidas fuentes energéticas sostenibles y locales.</li> <li>- El hidrógeno se puede almacenar, pudiendo servir como método de almacenamiento de la energía de fuentes alternativas, las cuales son muy estacionales o cíclicas con el tiempo.</li> <li>- El uso de hidrógeno en pilas de combustible puede aumentar el rendimiento global del sistema, al no estar limitado a ciclos termodinámicos.</li> <li>- El uso del H<sub>2</sub> no produce CO<sub>2</sub>, ni contaminantes del aire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la dependencia energética.</li> <li>- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.</li> <li>- Desarrollo de un sistema optimizado de producción y distribución de H<sub>2</sub>.</li> </ul>

El Hidrógeno en vehículos puede utilizarse en motores de combustión interna (MCI) formando parte de una cadena de tracción convencional, o con pilas de combustible para configuraciones de tracción eléctrica.

Un motor de combustión estacionario puede alcanzar eficiencias del 42%, un buen motor de coche puede rondar el 25%, ya que en un ciclo de conducción normal la mayor parte del tiempo el motor trabaja a cargas parciales, estando muy lejos de alcanzar su máxima eficiencia. Mientras que una pila de combustible utilizando

hidrógeno, alcanza ya eficiencias del 60% (**Asociación española del Hidrógeno, 2013 (2)**) (Ver Fig. 8. del ANEXO III).

Para poder evaluar las distintas opciones de sistemas de propulsión y de futuros combustibles es necesario llevar a cabo un análisis completo del ciclo de vida del combustible, comúnmente llamado análisis del “pozo a las ruedas” (WTW: Well-to-Wheels). En este análisis se utilizan el consumo de energía y las emisiones asociadas con la producción del combustible (o análisis del “pozo al tanque” (WTT: Well-to-Tank), es decir, el consumo de energía y las emisiones asociadas para tener el combustible en el depósito del vehículo, y el consumo de energía y emisiones asociados al funcionamiento del vehículo (o análisis del “tanque a la rueda” ( TTW: Tank-to-Wheel) .

EUCAR (European Council for Automotive R&D), CONCAWE (Oil companies' European association for environment, health and safety in refining and distribution) y JRC (Joint Research Centre of the European Commission) han actualizado su evaluación conjunta WTW del uso de la energía y de la emisión de gases de efecto invernadero para una amplia gama de combustibles futuros y para distintas opciones de sistemas de propulsión (**Edwars R. et al., 2011**).

La producción a gran escala de combustibles sintéticos o de hidrógeno a partir de carbón o gas reducen de manera considerable las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub>. Los principales obstáculos que obtienen estas técnicas para aplicarlas a gran escala son los elevados costes y las complejidades asociadas a la recogida del material, el tamaño de la planta y la eficiencia.

En lo que se refiere a los combustibles y vehículos convencionales, los avances en distintas tecnologías permiten mejorar la eficiencia energética y la reducción de los gases de efecto invernadero.

**Edwars R. et al., 2011** afirmaron que existen muchas vías de producir hidrógeno y los resultados dependen de la vía elegida. Si el hidrógeno es producido a partir de gas natural, la reducción de emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero se consiguen si el hidrógeno se utiliza en FCVs. El consumo de energía y las emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero son más elevadas para el caso de los vehículos de motor de combustión interna que utilizan hidrógeno como combustible que para el caso de los vehículos convencionales y de gas natural.

A corto plazo, el gas natural es la única fuente viable de obtener hidrógeno a gran escala. La reducción de emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero solamente se conseguirá si se utiliza hidrógeno en FCVs aunque con costes muy elevados. Los vehículos de motor de combustión interna de hidrógeno estarán disponibles en un plazo corto a menor coste que los vehículos de pila de combustible. Su uso aumentará las emisiones de gases de efecto invernadero, siempre y cuando el hidrógeno se produzca a partir de gas natural.

La electrólisis tiene mayor emisión de gases de efecto invernadero que la producción de hidrógeno a partir de gas natural. Mientras que la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables (biomasa, eólica y nuclear) genera emisiones bajas.

Por otro lado los reformadores a bordo ofrecen la oportunidad de establecer la tecnología de los FCVs con la infraestructura de distribución de combustible que existe actualmente.

Considerando el hidrógeno como combustible, prácticamente todas las emisiones de gases de efecto invernadero se producen en la parte “WTT”, por lo que es interesante la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Las pilas de combustible consumen menos energía que los motores de combustión interna, que actualmente son menos eficientes (Ver fig. 11 de ANEXO III).

En este estudio se llevó a cabo el análisis WTW para el caso de una combinación de reformado de un hidrocarburo y de una pila de combustible y se observó que es menos favorable que el uso de hidrógeno obtenido a partir de gas natural combinado con una pila de combustible, la principal razón es la baja eficiencia de los reformadores a bordo debido a su reducido tamaño.

Si se compara con el caso de tener gasolina como combustible, la opción del reformador a bordo sería ligeramente mejor que el motor de combustión interna. Por lo que el estudio concluye que la producción de hidrógeno a bordo consume más energía y produce mayor emisión de gases de efecto invernadero que la producción de hidrógeno estacionaria.

Los vehículos de pila de combustible (FCVs) que utilizan hidrógeno obtenido a partir de gas natural son de 2 a 3 veces más eficientes que los vehículos convencionales de gasolina, diesel o gas natural. Además los FCVs emiten 60% menos gases de efecto invernadero que los vehículos convencionales, y el 35% menos de gases de efecto invernadero que los vehículos de gas natural (**California Fuel Cell Partnership, 2009**).

Los FCVs que utilizan hidrógeno obtenido a partir de la biomasa emitirán un 83% menos de gases de efecto invernadero que los vehículos actuales de gasolina (2012 Gasoline) y consumirán un 98% menos de petróleo (**DOE, U.S. Department of Energy, 2013**).

Por otro lado la seguridad del H<sub>2</sub> es un aspecto a tener en cuenta para un futuro uso masivo del hidrógeno, para ello es clave tener en cuenta su masa molecular que es la más baja de los elementos gaseosos, lo que da idea de su difusividad y de su baja densidad. Otras propiedades importantes son la temperatura de ignición y la toxicidad.

En cuanto al coste del H<sub>2</sub>, producir hidrógeno en una planta centralizada no es caro, pero debido a sus características, baja densidad energética por unidad de volumen, los costes de almacenamiento y transporte sí que son elevados. En los comienzos de la introducción del Hidrógeno hay que asumir que los sistemas de producción serán de tipo distribuido ya que la demanda no será elevada. En la *Tabla 6* se muestran las eficiencias y costes medios de las distintas técnicas de producir H<sub>2</sub>.

Se observa que uno de los procesos más baratos para producir H<sub>2</sub> y que menos contamina es la producción mediante la gasificación de biomasa.

Según un estudio llevado a cabo por **Thomas CE, 2003(3)** el coste del hidrógeno producido localmente a partir de gas natural mediante reformadores de metano in-situ es menor que el coste de producir hidrógeno en una planta y tener que distribuirlo con camiones cisterna o trailers de tubos (tube trailers).

*Tabla 6. Eficiencias y costes medios de distintas técnicas de producir H<sub>2</sub>. Fuente: González A.  
Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*

PROCESO	EFICIENCIA (%)	DISPONIBILIDAD	CENTRALIZADA/ DESCENTRALIZADA	EMISIONES CO <sub>2</sub> g CO <sub>2</sub> ( kWh H <sub>2</sub> )	PRECIO (€/kWh H <sub>2</sub> )
Gas Natural (SMR sin CCS)	70-75	Ya disponible	Ambas	288-292	0.07-0.1
Gas Natural (SMR con CCS)	60	Medio Plazo	Centralizada	42.7	0.09-0.15
Gasificación Carbón (sin CCS)	50-60	Ya disponible	Centralizada	659	0.07
Gasificación Carbón (con CCS)	40-50	Medio Plazo	Centralizada	20.3	0.08
Gasificación Biomasa	56	Medio Plazo	Descentralizada (cerca del recurso)	0	0.07-0.08
Electrólisis (con Eólica)	65-70	Corto Plazo	Ambas	0	0.11-0.15
Electrólisis (con Red Eléctrica)	30	Ya disponible	Descentralizada	440	0.2
Ciclos					
Termoquímicos (Energía Solar)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.18
Ciclos					
Termoquímicos (Energía Nuclear)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.06

El estudio llevado a cabo por **McKinsey & Company (2011)** afirma que los costes de la infraestructura de hidrógeno son aproximadamente un 5% del coste total del FCVs (1.000 €-2.000€ por vehículo). Dicho estudio también afirma que se espera que los costes de los sistemas de pila de combustible disminuyan un 90%, debido a las economías de escala y a las mejoras en la tecnología.

En España, Carburos metálicos tiene una estación de repostaje de hidrógeno en Zaragoza en la que un kilo de hidrógeno cuesta aproximadamente 12 euros. El objetivo de coste (en dólares de 2007) establecido por el DOE para el año 2015 son 3,10 \$/kg de H<sub>2</sub> para el caso de plantas de hidrógeno centrales y de 3,70 \$/kg de H<sub>2</sub> para el caso de plantas de hidrógeno distribuidas (**US. Department of Energy, 2013 (2)**).

El estudio **McKinsey & Company (2011)** afirma que el coste del hidrógeno se reducirá un 70% en 2025 debido a la mayor utilización del abastecimiento de hidrógeno y a las economías de escala, por ejemplo, el coste capital de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno se espera que se reduzca un 50% entre el año 2010 y el año 2020.

*Nota: El trabajo completo para la elaboración de este capítulo se puede consultar en el ANEXO III.*

#### 4. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO DE ESTE TIPO DE COMBUSTIBLE ( $H_2$ ).

En este capítulo se va a revisar y analizar la posibilidad de suministro de este tipo de combustible analizando las características del hidrógeno suministrado. El uso extendido del hidrógeno necesitará una amplia y nueva infraestructura para producirlo, distribuirlo, almacenarlo y dispensarlo como combustible de automoción.

Actualmente existe todavía un número muy limitado de estaciones de repostaje de hidrógeno, y la mayoría tienen carácter privado. Lo más común es que en estas instalaciones se produzca el hidrógeno “in situ”, a partir de fuentes de energía renovables (eólica, solar, etc...) y electrólisis del agua, a partir del reformado de hidrocarburos (gas natural, por ejemplo) o utilizando otras tecnologías (**McKinsey & Company, 2011**).

A continuación se indican las opciones de suministro de hidrógeno:

- a) el hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, después es licuado y suministrado por camiones a las distintas estaciones de servicio.
- b) el hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a las estaciones de servicio.
- c) el hidrógeno procedente de la industria química (por ejemplo, exceso de capacidad en plantas de amoniaco, las cuales hace unos años mejoraron su capacidad de producción, etc...), y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a estaciones de servicio.
- d) el hidrógeno producido en estaciones de servicio vía reformado de gas natural a pequeña escala, o por reformado de líquidos disponibles, que sean portadores de hidrógeno, como pueden ser el metanol o el amoniaco.
- e) el hidrógeno producido vía electrólisis a pequeña escala en estaciones de servicio.

**Mulder y Girard (2004)** concluyen que las estaciones de hidrógeno de gran tamaño, en las que se produce hidrógeno in-situ, ofrecen un precio del hidrógeno muy competitivo.

##### 4.1. Producción de $H_2$ .

La producción mundial de  $H_2$  se sitúa en torno a 65 millones de toneladas anuales (**Agencia Internacional de la Energía, 2007**), equivalente a 8EJ (8 exajulio =  $8 \times 10^{18}$  J), menos del 2% del suministro mundial de energía primaria; el 48% proviene del gas natural, el 30% del petróleo, el 18% del carbón y el 4% de la electrólisis (**UNICAMP, 2013; Agencia Internacional de la Energía, 2007**). Es decir, en la actualidad prácticamente el 96% del hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente por reformado de gas natural con vapor de agua. Pero estas

tecnologías tienen la desventaja de que en la producción de hidrógeno se emite también CO<sub>2</sub>, y que se utilizan como materias primas recursos agotables.

En general, puede afirmarse que no es caro producir hidrógeno en una gran planta centralizada, sin embargo, debido a su baja densidad energética por unidad de volumen, los costes de almacenamiento y transporte sí que son elevados.

El reformado y la electrólisis para la producción de hidrógeno constituyen procesos que ya están disponibles comercialmente. El hidrógeno actualmente es más caro que los combustibles convencionales, pero se espera que se pueda producir en Europa con costes por kilómetro recorrido competitivos.

#### 4.2. Almacenamiento de H<sub>2</sub>.

Debido a su baja densidad, el hidrógeno es un gas costoso de almacenar. No obstante existe una gran variedad de posibilidades para su almacenamiento de forma que puede seleccionarse la técnica más adecuada para cada aplicación.

El hidrógeno se puede almacenar a bordo de los vehículos, en la planta donde se produce el hidrógeno o en las estaciones de repostaje.

Las distintas formas de almacenar el hidrógeno se pueden agrupar en:

- Almacenamiento físico de H<sub>2</sub> gas comprimido en depósitos a elevada presión (700 bar).
- Almacenamiento físico de H<sub>2</sub> criogénico (enfriado a -253°C y a presiones entre 6-350 bar) en depósitos aislados.
- Almacenamiento en materiales avanzados (almacenamiento sólido), dentro de la estructura o sobre la superficie de ciertos materiales (mediante adsorción), así como en forma de componentes químicos que mediante una reacción liberan hidrógeno.

En las aplicaciones de automoción el objetivo establecido por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) es almacenar 5 kg de hidrógeno (equivale a una autonomía de unos 500 km en un vehículo con pila de combustible) y que la densidad de almacenamiento pueda alcanzar del 5 al 6% en peso (o expresado en densidad, 60 kg/m<sup>3</sup>). También se requiere que el hidrógeno se libere a temperaturas entre 80 y 150°C, que el tiempo y energía necesaria para el llenado sean pequeños y que el coste del tanque no sea muy elevado.

El hidrógeno líquido y el gaseoso a una presión de 700 bar son las formas de almacenamiento que ocupan menos volumen (Ver Fig.2 de ANEXO IV), pero son de 7 a 9 veces más voluminosos que un tanque de gasolina para un contenido de combustible equivalente.

El hidrógeno como gas se almacena a presión en botellas convencionales de acero o en tanques ligeros de fibra de carbono. En turismos la solución apunta al uso de botellas de almacenamiento de 700 bar con el objeto de reducir el volumen del tanque.

Una alternativa a esta forma de almacenamiento, en automoción, la ofrecen las microesferas de vidrio (Holow glass microspheres (HGM)). Este método se basa en la

permeabilidad del hidrógeno a elevada presión (350-700 bar) y a temperaturas de 300°C en los huecos de las microesferas en un envase resistente a la presión (**Mohtadi Rana et al. 2011**).

El hidrógeno puede almacenarse en forma líquida a temperaturas criogénicas (-253 °C), tiene como ventaja su densidad energética por unidad de volumen (muy superior a la del hidrógeno gas). Tiene como desventajas que en el proceso de licuación se consume aproximadamente del 30 al 40% del PCI, mientras que el proceso de compresión in-situ requiere entre un 5 y un 20% del PCI y los requerimientos energéticos para almacenar hidrógeno a 700 bar e hidrógeno líquido son respectivamente un 4 y un 10% del PCI (**DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009**). Otra desventaja es que existen pérdidas por evaporación y resulta imprescindible utilizar contenedores criogénicos aislados.

En la actualidad, las opciones que existen de almacenamiento (gaseoso en botellas de fibra de carbono a 350-700 bar y almacenamiento criogénico) son muy caras.

El **almacenamiento sólido** (almacenamiento de hidrógeno por absorción), si se compara con el gaseoso o líquido, tiene el potencial de almacenar una cantidad equivalente de hidrógeno en menor volumen y a menores presiones y consumiendo menos energía, pero todavía está en su estado inicial de desarrollo.

Dentro del almacenamiento sólido hay distintos tipos: almacenamiento de hidrógeno criocomprimido ( $C_2H_2$ ), nanotubos de carbono y nanofibras de grafito, hidruros metálicos (tecnología más desarrollada), hidruros químicos y otros medios. Todas estas formas de almacenamiento están brevemente explicadas en la sección 4.2 del **ANEXO IV**.

La elección de la tecnología del sistema de almacenamiento en los vehículos es crítica ya que condiciona la infraestructura de producción, distribución y llenado que debe establecerse.

Los cambios necesarios en el almacenamiento de  $H_2$  en los vehículos tienen como objeto hacer que la tecnología sea capaz de almacenar la cantidad de hidrógeno necesaria para una autonomía de conducción de 300 millas (483 km), cumpliendo los requerimientos de peso, volumen, durabilidad, eficiencia y coste total. En *tabla 10 del ANEXO IV* aparece un resumen de las principales tecnologías de almacenamiento de  $H_2$  junto con los objetivos establecidos por el DOE.

También hay que tener en cuenta que si en lugar de almacenar hidrógeno puro, se almacena un hidrocarburo líquido o un alcohol del cual se obtiene posteriormente el hidrógeno mediante un proceso de reformado, es necesario disponer de un reformador a bordo del vehículo.

#### 4.3. Infraestructura de transporte y distribución del H<sub>2</sub>.

En la infraestructura energética del hidrógeno un aspecto importante es el sistema de distribución que transporta el hidrógeno desde el punto de producción hasta el punto donde finalmente se utiliza.

Actualmente la infraestructura de hidrógeno es limitada. Si en Europa en 2030 hubiese 40 millones de vehículos de pila de combustible de hidrógeno, se necesitarían 19.000 estaciones de repostaje de hidrógeno (**Pollet Bruno G. et al. (2012)**).

Los costes de la infraestructura del hidrógeno suponen aproximadamente el 5% del coste total de los vehículos de pila de combustible (**McKinsey & Company, 2011**).

Actualmente existe una infraestructura industrial limitada para la distribución del hidrógeno en forma de líquido criogénico o gas comprimido. Esta distribución se realiza principalmente mediante camiones cisterna aunque también hay redes de tuberías que abastecen a grandes consumidores industriales.

Tanto la licuación como la compresión del hidrógeno consumen bastante energía lo que incrementa el coste de la distribución.

Los costes asociados al transporte y almacenamiento del hidrógeno son uno de los principales obstáculos que impiden que el hidrógeno sea competitivo en coste con los combustibles convencionales. En el futuro se necesitarán soluciones como la producción descentralizada del hidrógeno en el mismo punto de venta o en sus cercanías. Para las aplicaciones en el transporte, los costes de las estaciones de reabastecimiento suponen también un obstáculo importante y requerirán medidas que consideren al hidrógeno como un combustible convencional.

También se necesitarán iniciativas importantes para promover la aceptación pública del hidrógeno, principalmente en todo lo referido a la seguridad de la infraestructura de suministro y almacenamiento.

Por lo tanto, los costes de inversión que requiere la infraestructura del hidrógeno son masivos y el riesgo es alto por la incertidumbre que rodea a las nuevas tecnologías, y a la fecha y al ritmo de su introducción en el mercado.

Hay que tener en cuenta que si hay producción distribuida en el punto de uso se eliminan los costes de transporte pero aumenta los de producción ya que se pierde la economía de la producción a gran escala.

En Europa en la actualidad hay un total de 80 hidrogeneras operativas y 54 planificadas, estando fuera de operación un total de 41 hidrogeneras. En concreto en España hay 4 hidrogeneras operativas cuyas características se presentan en las tablas 12, 13, 14 y 15 del ANEXO IV. Estas hidrogeneras se encuentran en Huesca, Zaragoza, Albacete y Sevilla.

*Nota: El trabajo completo para la elaboración de este capítulo se puede consultar en el ANEXO IV.*

## 5. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.

Para alcanzar simultáneamente los objetivos de reducir en un 80% los gases de efecto invernadero por debajo de los niveles de 1990 en el sector del transporte de vehículos ligeros, eliminar casi toda la dependencia del combustible importado para el transporte y eliminar la mayoría de la contaminación, la mayor parte de los vehículos ligeros deberían convertirse en vehículos completamente eléctricos, bien impulsados por baterías o por pilas de combustible con baterías.

En esta comparativa se van a analizar los vehículos eléctricos (BEVs), los vehículos eléctricos híbridos (HEVs), los vehículos de pila de combustible (FCEVs), los vehículos de motor de combustión interna de hidrógeno y los vehículos de motor de combustión interna alternativa de encendido provocado.

Si se comparan los FCEVs con los BEVs, en cuanto a peso, los FCEVs son mejores porque pesan menos. Para analizar la influencia de la masa del vehículo **Thomas CE (2), 2009** analiza la energía específica útil (energía por unidad de masa) de distintos tipos de baterías y de un sistema de pila de combustible PEM que incluye tanques de almacenaje de hidrógeno comprimido (a 35 MPa y a 70 MPa) (*Fig.3*).

En la *Fig.3.* se observa que una pila de combustible alimentada por Hidrógeno comprimido puede proporcionar una energía por unidad de masa (Wh/kg) cinco veces mayor que las baterías actuales de Metal híbrido-Niquel utilizadas en la mayoría de vehículos híbridos de gasolina, y dos veces más que las baterías Ion-Litio. Por lo tanto se concluye que los vehículos eléctricos con batería deben ser más pesados que los vehículos de pila de combustible para una autonomía dada. El aumento de masa del vehículo de pila de combustible es insignificante ya que para ampliar la autonomía del vehículo los depósitos de hidrógeno son un poco más grandes lo que supone un ligero aumento de peso, mientras que la masa de las baterías del vehículo eléctrico aumentan significativamente para aumentar la autonomía, el crecimiento del peso no es lineal ya que cada kg extra de batería supone un incremento de la masa estructura, frenos más pesados, un motor de tracción más grande y todo esto conlleva la necesidad de una batería mayor. (Ver *Fig.5 del ANEXO V*).

En cuanto al volumen del sistema de almacenamiento de energía, los tanques de hidrógeno comprimido en los FCVs ocupan más espacio que el depósito de gasolina, pero estos tanques más el sistema de pila de combustible ocupan menos espacio que las baterías por unidad de energía útil transmitida al motor.

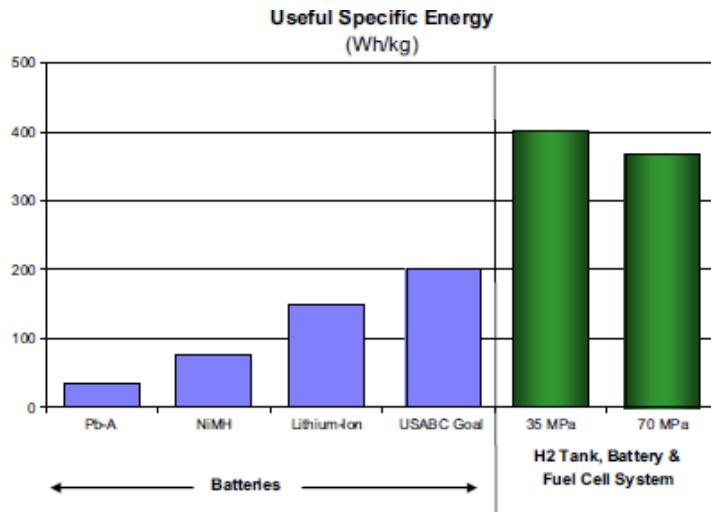


Fig.4. Comparación de la energía específica útil (energía por unidad de masa) de los sistemas de pila de combustible y de varios tipos de baterías. Fuente: (**Thomas CE (2), 2009**).

Si se analiza el tiempo de repostaje, un BEV de segmento medio con una carga máxima de batería tiene una autonomía de 150 km si circulan a 120 km/h por autopista y los tiempos de recarga de los BEVs son más elevados, 6-8 horas utilizando un equipo de carga normal. Los FCEVs con un rendimiento de conducción similar, tienen una autonomía de 600 km y un tiempo de recarga inferior a 5 minutos, comparable con los vehículos de motor de combustión interna (**McKinsey & Company, 2011**).

Para hacer un balance de emisiones de CO<sub>2</sub> de distintos combustibles alternativos y de distintos sistemas de propulsión se lleva a cabo un análisis del ciclo completo WTW, estableciendo como referencia para dicho análisis las emisiones medias producidas por los vehículos de gasolina en el año 2002 (Ver Fig.7 de ANEXO V). Se obtiene las siguientes conclusiones:

- Se observa que los vehículos actuales de gasolina y diesel tienen un nivel de emisiones CO<sub>2</sub> más reducido que los vehículos establecidos como referencia.
- Los vehículos eléctricos tienen emisiones nulas en el tubo de escape.
- Los vehículos híbridos producen menos emisiones CO<sub>2</sub> que la mayoría de automóviles con motor de combustión interna disponibles en el mercado.
- Los vehículos alimentados con hidrógeno tienen emisiones nulas de CO<sub>2</sub> en el punto de utilización (en el caso de los vehículos de pila de combustible) o muy bajas (en el caso de los vehículos con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno).

Como se puede observar en la Fig.7 del ANEXO V, si se utiliza una fuente de energía renovable como la eólica, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es muy importante. Mientras que si el hidrógeno se obtiene mediante reformado del gas natural, la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> ya no es tan importante.

El estudio llevado a cabo por **McKinsey & Company, 2011** concluye que los BEVs, PHEVs y FCEVs tienen el potencial necesario para reducir de manera importante las emisiones de CO<sub>2</sub> y las emisiones locales.

El objetivo establecido por la Comisión Europea para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es no superar los 125 gr de CO<sub>2</sub>/km en el año 2015 (**Parlamento Europeo, 2013**).

En cuanto al balance energético, se lleva a cabo el mismo análisis comparativo considerando como referencia el consumo de energía del vehículo de gasolina del 2002. Se tiene en cuenta el consumo de energía en el ciclo completo, WTW, teniendo en cuenta así la eficiencia de la producción de combustible y la eficiencia del vehículo. En la *Fig.8 del ANEXO V* se puede observar este balance energético, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Los vehículos híbridos permiten una mayor reducción del consumo energético (~35%) ya que su eficiencia energética es mayor.
- Si se utiliza H<sub>2</sub> obtenido por reformado de gas natural en vehículos con motor de combustión interna, el consumo de energía fósil es ligeramente superior al caso de utilizarse gas natural.
- Si se utiliza H<sub>2</sub> en un FCVs, el consumo de energía es menor debido a la mayor eficiencia del sistema de propulsión.

Si se analiza el grado de desarrollo tecnológico y de las infraestructuras para cada uno de los sistemas de propulsión analizados se observa que la tecnología de vehículo híbrido es la más desarrollada. También se observa que el grado de desarrollo de la tecnología de vehículos eléctricos y del uso del hidrógeno en MCI es alto, mientras que en el caso de la pila de combustible el grado de desarrollo es bajo. El grado de desarrollo de la infraestructura de la pila de combustible y del MCI con H<sub>2</sub> es muy bajo (**FITSA, IDAE, 2008**).

### **5.1. Comparativa económica de los distintos tipos vehículos.**

Para hacer una comparativa económica entre los distintos tipos de vehículos se va a utilizar el coste total de propiedad (TCO, total cost of ownership), pero simplificado ya que solamente se va a tener en cuenta el precio de compra del vehículo y el precio del combustible (Ver fórmula en sección 5.7 del ANEXO V).

Se lleva a cabo la comparación entre el TCO de FCVs y el TCO de vehículos de gasolina y de vehículos de gasóleo. Para calcular el TCO de vehículos de pila de combustible se ha considerado como referencia el vehículo Hyundai ix35 fuel cell (ver *Tabla 7*) cuyo precio de compra son 125.000 € y tiene un consumo de 0,95 kg H<sub>2</sub> / 100 km. Se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 15 años (**McKinsey & Company, 2011**). Para calcular el TCO se han considerado distintos precios del combustible, en este caso el hidrógeno (desde 0 hasta 20 €/kg H<sub>2</sub>), de esta manera se analiza como varía el TCO en función del coste del hidrógeno. Se observa que al aumentar el precio del H<sub>2</sub> el TCO lógicamente aumenta.

Tabla 7. Tabla comparativa de un vehículo de pila de combustible, de un vehículo de gasolina y de un vehículo diesel. Fuente: **Elaboración propia.**

	PILA DE COMBUSTIBLE	GASOLINA	DIESEL
Fabricante	Hyundai	Hyundai	Hyundai
Vehículo	ix35 fuel cell	Hyundai ix35 1.6 GDi 4x2 stadt	Hyundai ix35 2.0 CRDi 4x2 Tecno
Año	2012	2013	2013
P(kW)	100 kW (136 CV)	99kW (135 CV) <sup>(3)</sup>	100kW (136 CV) <sup>(4)</sup>
Consumo (kg H <sub>2</sub> /100 km)	0,95 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(2)</sup>	6,8 l / 100 km <sup>(3)</sup>	5,5 l / 100 km <sup>(4)</sup>
Consumo (MJ/100 km)	114 MJ/100 km	219,43 MJ/100 km <sup>(6)</sup>	197,23 MJ/100 km <sup>(6)</sup>
PCI	120 MJ/kg	43,2 MJ/kg <sup>(5)</sup>	43,1 MJ/kg <sup>(5)</sup>
Autonomía	594 km		
Velocidad máxima	160 km/h	178 km/h <sup>(3)</sup>	182 km/h <sup>(4)</sup>
Fabricante Pila	HMC (Hyundai Motor Company)		
Volumen Pila	1,65 kW/l (densidad de potencia) <sup>(1)</sup>		
Precio	125.000 €	20.157 € <sub>(tarifa 15/06/2013)</sub> <sup>(3)</sup>	25.947 € <sub>(tarifa 15/06/2013)</sub> <sup>(4)</sup>
Depósito (capacidad)	2 depósitos, 5,64 kg (en total)	58 litros <sup>(3)</sup>	58 litros <sup>(4)</sup>
Aspectos especiales	Ganador del premio FuturAuto 2013. Arranca a -25 °C. Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos ix35 Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.		
Combustible	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Gasolina	Gasóleo
Peso	1830 kg <sup>(2)</sup>	1380 kg <sup>(3)</sup>	1533 kg <sup>(4)</sup>
Peso Bruto	1980 kg <sup>(2)</sup>		

(1) [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)

(2) [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_nov\\_marca/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_nov_marca/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)

(3) <http://www.km77.com/precios/hyundai/ix35/2010/ix35-16-gdi-4x2-stadt>

(4) <http://www.km77.com/precios/hyundai/ix35/2010/ix35-20-crdi-136-cv-4x2-tecnico>

(5) [http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/TTW\\_Report\\_010307.pdf](http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/TTW_Report_010307.pdf)

(6) Valores densidad distintos combustibles: <http://www.boe.es/boe/dias/2010/09/04/pdfs/BOE-A-2010-13704.pdf>

Por otro lado, para calcular el TCO de un vehículo de gasolina y llevar a cabo un análisis comparativo se ha considerado un vehículo de las mismas propiedades que el Hyundai ix35 fuel cell. El vehículo analizado es Hyundai ix35 1.6 GDi 4x2 stadt (ver *Tabla 7*). Para el vehículo de gasolina se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 10 años. En este tipo de vehículo se ha calculado el TCO para cuatro valores de precio de gasolina: precio actual de la gasolina 142,96 cts€ /l (valor de junio 2013) (**Minetur, 2013**), 2 €, 2,5 € y 3 €.

El vehículo de gasóleo que se ha utilizado para el análisis comparativo es el Hyundai ix35 2.0 CRDi 4x2 Tecno (ver *Tabla 7*). Para este vehículo se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 10 años. En este tipo de vehículo también se ha calculado el TCO para cuatro valores de precio de gasóleo: precio actual del gasóleo 133,41 cts€ /l (valor de junio 2013) (**Minetur, 2013**), 2 €, 2,5 € y 3 €.

Comparando el TCO, se observa que para el precio actual del vehículo de pila de combustible y para el precio actual de la gasolina y del gasóleo (**Minetur, 2013**), independientemente del coste del hidrógeno, el vehículo de pila de combustible actual no es competitivo ni con el vehículo convencional de gasolina ni con el vehículo de gasóleo y que para serlo tendría que tener un precio de compra más reducido.

Si el precio de compra del vehículo de pila de combustible fuese similar al precio de compra del vehículo de gasolina o gasóleo, en función del precio del hidrógeno el vehículo de pila de combustible podría ser un vehículo competitivo con dichos vehículos.

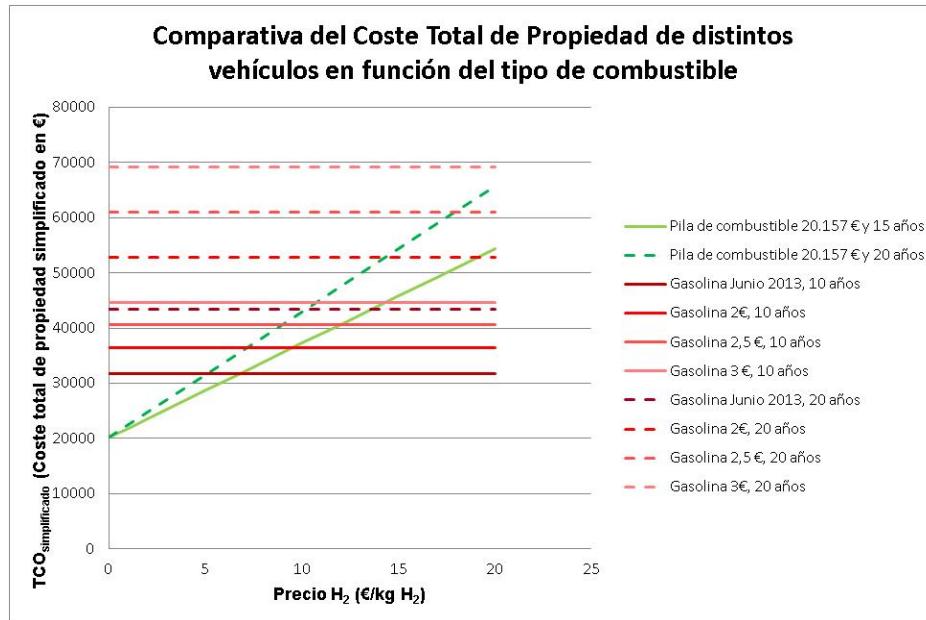


Fig. 5. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasolina). Fuente: **Elaboración propia**.

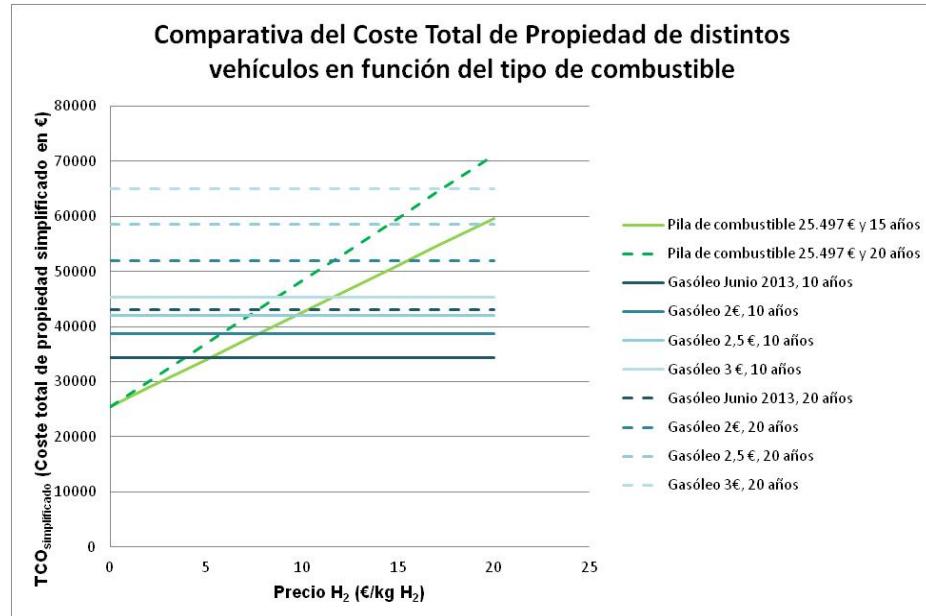


Fig. 6. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasóleo (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasóleo). Fuente: **Elaboración propia**.

En la *Fig. 5* se observa que para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 15 años y el vehículo de gasolina una vida útil de 10 años, para el precio actual de la gasolina (**Minetur, 2013**), el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina si el precio del hidrógeno fuese inferior a 6,82 €/kg H<sub>2</sub>. Si el precio de la gasolina fuese mayor, que va a ser la tendencia, el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina podría ser mayor. Si se lleva a cabo la misma comparativa pero para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años (línea verde discontinua) y para el caso de que el vehículo convencional de gasolina tenga una vida útil de 20 años (línea roja discontinua), que es la tendencia al desarrollarse la tecnología actual, se concluye que para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasolina (al precio actual de la gasolina) el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 10,23 €/kg H<sub>2</sub>. Este precio del hidrógeno es más elevado que para el caso de que la vida útil del vehículo de pila de combustible fuese de 15 años y la vida útil del vehículo de gasolina fuese de 10 años, ya que al incrementar la vida útil del vehículo el TCO aumenta.

Si se lleva a cabo el mismo análisis para el caso del vehículo de gasóleo (*Fig.6*) se observa que para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 15 años y el de gasóleo de 10 años, para el precio actual del gasóleo (**Minetur, 2013**), el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina si el precio del hidrógeno fuese inferior a 5,15 €/kg H<sub>2</sub>. Al incrementarse el precio del gasóleo, el precio del hidrógeno a partir del cuál el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasóleo también se incrementaría. Mientras que si se lleva a cabo la misma comparativa pero para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años (línea verde discontinua) y para el caso de que el vehículo de gasóleo tenga una vida útil de 20 años (línea azul discontinua), que es la tendencia al desarrollarse la tecnología actual, se concluye que para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasóleo (al precio actual de la gasolina) el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 7,72 €/kg H<sub>2</sub>. Este precio del hidrógeno es más elevado que para el caso de que la vida útil del vehículo de pila de combustible fuese de 15 años y la vida útil del vehículo de gasolina fuese de 10 años, ya que al incrementar la vida útil del vehículo el TCO aumenta.

Una vez realizado el análisis comparativo del coste total de propiedad de cada vehículo en función del tipo de combustible utilizado, se ha llevado a cabo un análisis comparativo de este coste por kilómetro recorrido.

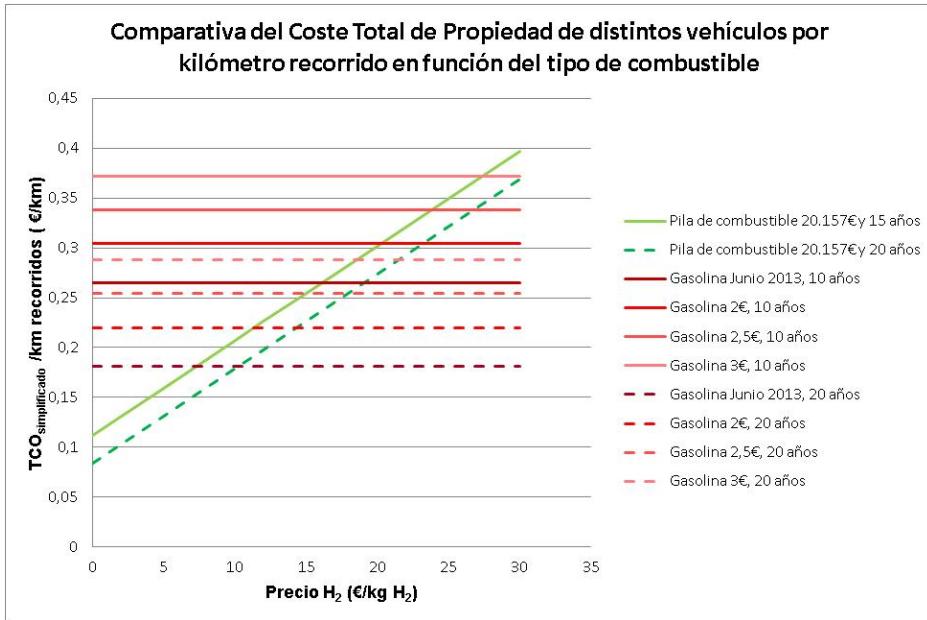


Fig. 7. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos por kilómetro recorrido en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasolina). Fuente: **Elaboración propia**.

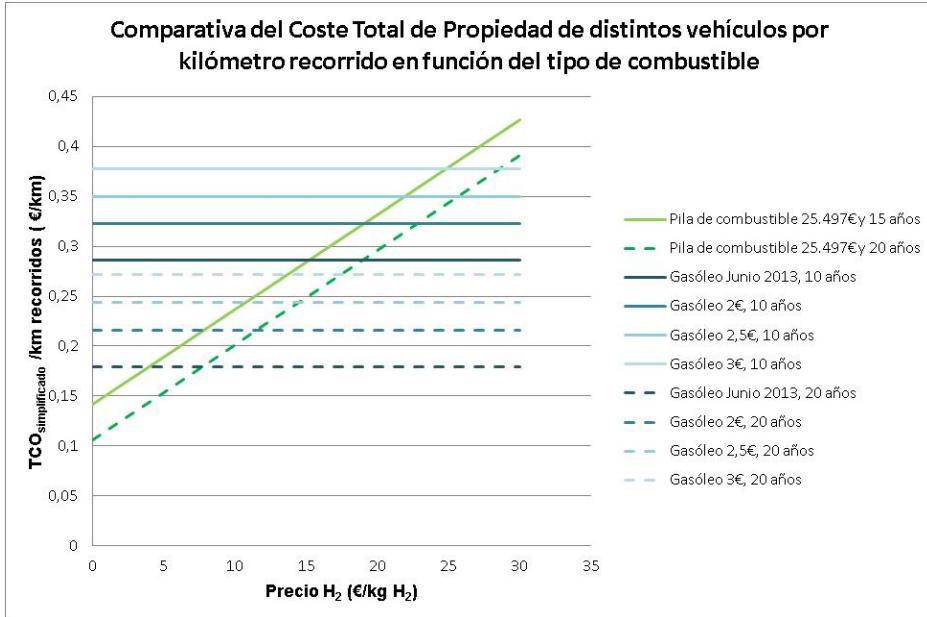


Fig. 8. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos por kilómetro recorrido en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasóleo (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasóleo). Fuente: **Elaboración propia**.

En este caso, para que el vehículo de pila de combustible sea competitivo con el vehículo de gasolina convencional, suponiendo una vida útil para el primero de 15 años y una vida útil para el vehículo de gasolina de 10 años (situación actual) y suponiendo el precio actual de la gasolina, el hidrógeno tendría que costar menos de 16,12 €/kg  $\text{H}_2$  (ver Fig.7). Se observa que si se tienen en cuenta los kilómetros recorridos durante la vida útil este límite es más elevado esto se debe a que actualmente la vida útil del vehículo de pila de combustible es mayor que la vida útil del vehículo convencional de gasolina.

En el supuesto de que tanto el vehículo de gasolina como el vehículo de pila de combustible tuviesen una mayor vida útil, 20 años para los dos casos, el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido lógicamente sería inferior y por lo tanto el valor del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina también sería inferior: 10,23 €/kg H<sub>2</sub> para el caso de que la gasolina tuviese el precio actual.

Si se realiza el mismo análisis para el caso del vehículo de gasóleo, para que el vehículo de pila de combustible sea competitivo con el vehículo de gasóleo, suponiendo una vida útil para el primero de 15 años y una vida útil para el vehículo de gasóleo de 10 años y suponiendo el precio actual del gasóleo, el hidrógeno tendría que costar menos de 15,17 €/kg H<sub>2</sub> (ver Fig.8), este límite es un poco inferior al que se daba en el caso de la gasolina esto es debido a que el precio del vehículo de gasóleo es superior y a que el precio del gasóleo es inferior. Se observa que si se tienen en cuenta los kilómetros recorridos durante la vida útil este límite es más elevado esto se debe a que actualmente la vida útil del vehículo de pila de combustible es mayor que la vida útil del vehículo de gasóleo.

En el supuesto de que tanto el vehículo de gasóleo como el vehículo de pila de combustible tuviesen una vida útil de 20 años, el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido lógicamente sería inferior y por lo tanto el valor del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasóleo también sería inferior: 7,72 €/kg H<sub>2</sub> para el caso de que la gasóleo tuviese el precio actual.

*Nota: El trabajo completo para la elaboración de este capítulo se puede consultar en el ANEXO V.*

## 6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H<sub>2</sub> MEDIANTE FUENTES RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE A LOS VEHÍCULOS.

El panorama energético actual presenta dos problemas bien conocidos el agotamiento de los recursos no renovables y la contaminación ambiental relacionada con el quemado de los combustibles fósiles. Estos problemas motivan la búsqueda de fuentes de energía perdurables y limpias que, junto con otras medidas como el ahorro y la eficiencia en el proceso de producción y consumo de energía y el desarrollo de sistemas generalizados de acumulación de energía limpios, solucionen el abastecimiento energético a medio y largo plazo.

El hidrógeno es el elemento más básico y abundante de la naturaleza pero no se encuentra aislado, es decir, hay que producirlo. La producción del H<sub>2</sub> a partir de hidrocarburos no parece una solución a largo plazo ya que no solucionaría el problema del agotamiento de recursos naturales. Los métodos más utilizados actualmente para la producción del hidrógeno son el reformado de hidrocarburos y la electrólisis del agua.

En la siguiente figura (Fig.9) se muestra la tendencia futura acerca de los procesos de producción de hidrógeno.

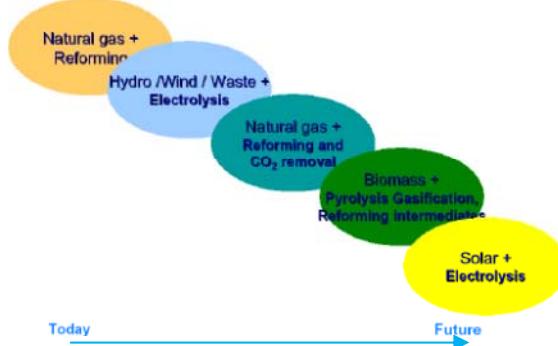


Fig.9. Tendencia futura de producción de H<sub>2</sub>. Fuente: **Asignatura Pilas de combustible y sus aplicaciones. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**)

Según expertos que han contribuido en el proyecto HyWAYS, en un principio el hidrógeno en España provendrá de la industria química y del reformado con vapor del gas natural para su aplicación en vehículos. A partir del año 2020, se prevé una producción masiva a partir de la gasificación de carbón nacional (con captura de CO<sub>2</sub>) y electrólisis a partir de energía eólica y solar de alta temperatura (**IDAE, Asociación Española del Hidrógeno, 2008**).

La producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa se puede llevar a cabo mediante procesos termoquímicos (reformado, pirolisis y gasificación) o mediante procesos biológicos (fermentación alcohólica y digestión anaeróbica).

Los procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno por general, se utilizan en sistemas centralizados. Presentan una eficiencia entre el 42-72%, con un coste de producción de 100 €/MWh, habiéndose demostrado una producción por gasificación de 100 a 400 toneladas/día y estando la pirolisis en un estadio comercial (**Asignatura Pilas de combustible y sus aplicaciones. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Los retos a resolver en la gasificación y pirolisis se refieren al pretratamiento de la biomasa, la retirada de cenizas y la limpieza de gas de síntesis. Mientras que los procesos biológicos se utilizan en sistemas descentralizados, siendo más lentos y costosos que los termoquímicos.

La gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa. En concreto, dos tipos de biomasa se pueden utilizar como materia prima para la producción de hidrógeno: los cultivos bioenergéticos y los residuos que son menos costosos, como residuos de cultivo agrícola o residuos de la transformación de la madera (residuos de biomasa). El hidrógeno se puede obtener a partir de del vapor de gasificación de paja de leguminosas, de serrín de pino, de cáscara de avellana, de astillas de pino, de paja de trigo y de residuos de madera (**Kirtay Elif, 2011**), entre otros.

## 6.1. Análisis del H<sub>2</sub> necesario para alimentar a la flota actual de vehículos en España y análisis de la forma de producirlo.

El parque nacional de turismos en España a 31 de diciembre de 2011 era de 22.277.244, último dato publicado por la Dirección General de Tráfico (**Dirección General de Tráfico, 2011**). Los kilogramos de hidrógeno necesarios al año para alimentar toda la flota de turismos nacional si los mismos funcionasen con hidrógeno son  $2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$  (Ver cálculos en ANEXO VI). Para ello se ha supuesto un consumo de 0,95 kg de H<sub>2</sub>/100 kilómetros, consumo del Hyundai ix35 fuel cell (**Hyundai, 2013 (3)**), y un recorrido de 12.000 kilómetros al año (**McKinsey & Company, 2011**).

La energía necesaria para producir esta cantidad de hidrógeno es  $1,6568 \times 10^{11} \frac{\text{kW h}}{\text{año}}$  (ver cálculos en ANEXO VI).

Una vez conocido este dato, si se tiene en cuenta los datos de producción nacional de energía eléctrica en el año 2011 (**Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2011**) se observa que durante este año se produjo un total de 42.007 GWh mediante energía eólica, un total de 7.019 GWh con energía fotovoltaica y un total de 1.777 GWh con energía termosolar. Por lo tanto se concluye que la energía renovable que podría cubrir la demanda de energía para alimentar a la flota nacional de turismos, si éstos fuesen vehículos de pila de combustible, sería la energía eólica ya que multiplicando por cuatro su producción actual se obtendrían los 165.680 GWh necesarios. Mientras que si se utilizase energía fotovoltaica habría que multiplicar su producción por 24 y si se utilizase energía termosolar habría que multiplicar su producción por 93, algo que material y económicamente imposible..

También se plantea la producción de hidrógeno a partir de biomasa, ya que es uno de los métodos de producción más baratos (**Balat Haava, Kirtay Elif, 2010**). La gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa.

En el estudio llevado a cabo por **Moreno J. y Dufour J. (2013)** se determina la viabilidad ambiental de cuatro residuos lignocelulósicos españoles (poda de vid, poda de almendro y residuos forestales de plantaciones de pino y de eucalipto) para la producción de hidrógeno mediante gasificación. De este estudio se obtienen los siguientes datos:

- Por cada 1,32 kg de residuo de pino se obtiene 0,0233 kg de H<sub>2</sub>.
- Por cada 1,11 kg de residuo de eucalipto se obtiene 0,016 kg de H<sub>2</sub>.
- Por cada 1,44 kg de poda de almendro se obtiene 0,027 kg de H<sub>2</sub>.
- Por cada 1,01 kg de poda de vid se obtiene 0,0233 kg de H<sub>2</sub>.

Con este dato de producción de hidrógeno a partir de diferentes tipos de biomasa, conocida la producción de biomasa por hectárea y conocida la cantidad de hidrógeno necesaria para alimentar la flota de turismos nacional ( $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$ ), permitirá calcular las hectáreas que se necesitan para producir esa cantidad de hidrógeno, de esta manera se sabrá si es viable la producción de hidrógeno a partir de biomasa para alimentar a toda la flota de turismos.

La producción de residuo de pino por hectárea es de 2379 kg de poda/hectárea (**Agencia Andaluza de la Energía, 2011**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesita  $1,1438 \times 10^{11}$  kg de residuo de pino y harían falta 60.462.523 hectáreas de pino. Si se tiene en cuenta las hectáreas que hay de pino actualmente, considerando el pino carrasco (*Pinus halepensis*), el pino pináster (*Pinus pinaster*), el pino silvestre (*P. sylvestris*) y el pin laricio (*P. nigra*), unas 4.650.000 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2)**), habría que multiplicar por 13 las hectáreas actuales para tener la biomasa necesaria para producir el hidrógeno que podría alimentar a la flota nacional de turismos.

La producción de residuo de eucalipto por hectárea es de 2792 kg /hectárea (**Agencia Andaluza de la Energía, 2011**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesita unos  $1,76 \times 10^{11}$  kg de residuo de eucalipto y 63.037.249 hectáreas de eucalipto. Si se tiene en cuenta las hectáreas que hay de eucalipto actualmente, 640.000 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2)**), habría que multiplicar por 98 las hectáreas actuales para tener la biomasa necesaria para producir el hidrógeno que podría alimentar a la flota nacional de turismos.

La producción de poda de almendro por hectárea es de 300 kg/hectárea (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesita unos  $1,35 \times 10^{11}$  kg de poda de almendro y harían falta 451.377.778 hectáreas de almendros. Si se tiene en cuenta que actualmente hay 571.183 hectáreas de almendros (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1)**), haría falta multiplicar por 790 las hectáreas actuales para tener la superficie necesaria para obtener el hidrógeno requerido para alimentar a la flota completa, por lo que no es muy viable esta opción.

Por otro lado, la producción de poda de vid por hectárea es de 800 kg/hectárea (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesita unos  $1,10 \times 10^{11}$  kg de poda de vid y harían falta 137.574.571 hectáreas de vid. Si se tiene en cuenta que actualmente hay 967.055 hectáreas de viñedo (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1)**), haría falta multiplicar por 142 las hectáreas actuales para obtener la superficie necesaria para obtener el hidrógeno requerido para alimentar a la flota nacional de turismos. Esta opción mejora a la anterior pero aún así hace falta mucha superficie.

Por lo tanto se concluye que de todas los tipos de biomasa analizados el más apropiado para producir la cantidad de hidrógeno necesario para alimentar a la flota nacional de turismos, si estos fuesen turismos de pila de combustible, serían los residuos de pino dado que existen muchas hectáreas para cubrir la necesidad.

Se plantea el utilizar un cultivo energético, este tipo de cultivo tiene como premisa fundamental la obtención, de forma rentable, de la máxima cantidad neta posible de energía. Interesa que sean especies vivaces, con capacidad rebrotadora. De este modo la técnica de obtención de altas productividades de biomasa consiste en aprovechar la capacidad de rebrote. Escogiendo como cultivo energético el chopo, se podría considerar una producción de 12-17 toneladas de materia seca/hectárea y año (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**).

Del estudio llevado a cabo por **Susmozas A. et al (2013)** se obtiene que por cada 36,28 kg de chopo se obtiene 1 kg de hidrógeno. De este modo para obtener  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesitan  $9,2 \times 10^{10}$  kg de chopo. Si se tiene en cuenta la producción por hectárea, consideramos una media de 15 toneladas/hectárea, harían falta 6.134 hectáreas de chopo. El número de hectáreas es mucho más reducido que para los casos analizados anteriormente, esto es debido a que por tratarse de un cultivo energético su productividad es mucho más elevada. Si tenemos en cuenta la superficie de cultivo de chopo en el año 2010, 137.192 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2010 (3)**), se comprueba que es posible producir los kilogramos de chopo necesarios para producir la cantidad necesaria de hidrógeno para abastecer a la flota nacional de turismo.

Por lo tanto se concluye que mediante la utilización de cultivos energéticos se podría generar el hidrógeno necesario para abastecer a la flota nacional de turismos, en el caso de que fuesen vehículos de pila de combustible.

*Nota: El trabajo completo para la elaboración de este capítulo se puede consultar en el ANEXO VI.*

## 7. CONCLUSIONES.

Una vez finalizado este trabajo se obtienen las siguientes conclusiones:

- En general, la evolución de los FCVs de distintos fabricantes ha ido en la línea de aumentar la potencia de la pila de combustible, aumentar la autonomía, aumentar la presión de almacenamiento del H<sub>2</sub> y así reducir el volumen que ocupa, mejorar la durabilidad y mejorar el arranque en frío.
- Sustituyendo la flota de vehículos de combustible fósil por vehículos eléctricos híbridos y por FCVs se reduce considerablemente la emisión de contaminantes debido a la eliminación de los productos de la combustión, se reducen incluso las cantidades netas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), de volátiles orgánicos compuestos (COV), de partículas, de amoniaco (NH<sub>3</sub>) y de monóxido de carbono (CO).

- Los costes asociados al transporte y almacenamiento del hidrógeno son uno de los principales obstáculos que impiden que el hidrógeno sea competitivo en coste con los combustibles convencionales. En el futuro se necesitarán soluciones como la producción descentralizada del hidrógeno en el mismo punto de venta o en sus cercanías.
- El desarrollo de estaciones de servicio de hidrógeno supondrá uno de los pasos más importantes para el uso generalizado de esta nueva fuente energética.
- Debido a los límites de capacidad de la batería y a la autonomía de conducción (actualmente 100-200 km para un vehículo medio) y el tiempo de recarga actual es de varias horas, los BEVs son apropiados para vehículos pequeños y para recorridos cortos, por ejemplo conducción urbana (incluyendo los nuevos modelos de transporte tales como compartir coche) (**McKinsey & Company, 2011**).
- Con una autonomía comparable a los vehículos de motor de combustión interna, los FCEVs son la solución mejor para vehículos medios/grandes y recorridos largos (**McKinsey & Company, 2011**).
- Los vehículos eléctricos (BEVs, FCEVs y PHEVs en conducción eléctrica) reducen la dependencia del petróleo.
- El objetivo es utilizar en los FCVs H<sub>2</sub> obtenido mediante electrólisis a partir de energías renovables como la biomasa o la energía eólica.
- La eficiencia global de los vehículos eléctricos es más elevada que la de los vehículos de motor de combustión interna (**McKinsey & Company, 2011**).
- Que la utilización de BEVs sea mayor depende de que se alcance un mayor grado de desarrollo de las baterías.
- La viabilidad económica de los FCEVs está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora del sistema de almacenamiento del H<sub>2</sub> en los vehículos y sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.
- Los PHEVs son más económicos que los BEVs y los FCEVs a corto plazo. En el año 2030, los BEVs, FCEVs y PHEVs tendrán un coste competitivo con los vehículos de motor de combustión interna en segmentos relevantes, pero con las subvenciones y ayudas, los BEVs y FCEVs podrían ser competitivos con los vehículos de motor de combustión interna en el año 2020 (**McKinsey & Company, 2011**).
- Se espera que los BEVs y los FCEVs tengan un precio de compra mayor que los vehículos de motor de combustión interna, menor coste de combustible (debido a su gran eficiencia y por no usar petróleo) y menor coste de mantenimiento (tienen menos partes mecánicas) (**McKinsey & Company, 2011**).
- Se espera que los costes de los sistemas de pila de combustible disminuyan un 90%, debido a las economías de escala y a las mejoras en la tecnología. (**McKinsey & Company, 2011**).
- Los MCI seguirán siendo el sistema de propulsión más importante en los próximos años.
- A corto y medio plazo, los vehículos híbridos serán los que tengan un mayor desarrollo.

- Como la adaptación de la infraestructura de la energía para que los BEVs y FCEVs tengan la economía de escala necesaria para alcanzar los objetivos de reducción de CO<sub>2</sub> establecidos por la EU, es costosa, se deben establecer unos planes de implementación para los BEVs y PHEVs( **McKinsey & Company, 2011**).
- En un principio el hidrógeno en España provendrá de la industria química y del reformado con vapor del gas natural para su aplicación en vehículos. A partir del año 2020, se prevé una producción masiva a partir de la gasificación de carbón nacional (con captura de CO<sub>2</sub>) y electrólisis a partir de energía eólica y solar de alta temperatura (**IDAE, Asociación Española del Hidrógeno, 2008**).
- La gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa.
- La energía renovable que podría cubrir la demanda de energía para alimentar a la flota nacional de turismos, si éstos fuesen vehículos de pila de combustible, sería la energía eólica ya que multiplicando por cuatro su producción actual se obtendrían los 165.680 GWh necesarios.
- De todas los tipos de biomasa analizados (residuo de pino, residuo de eucalipto, poda de almendro y poda de vid) el más apropiado para producir la cantidad de hidrógeno necesario para alimentar a la flota nacional de turismos, si estos fuesen turismos de pila de combustible, serían los residuos de pino dado que existen muchas hectáreas para cubrir la necesidad, pero aún así habría que multiplicar por 13 las hectáreas actuales de pino.
- Utilizando un cultivo energético (por ejemplo chopo) se podría generar el hidrógeno necesario para abastecer a la flota nacional de turismos, en el caso de que fuesen vehículos de pila de combustible.

## **8. BIBLIOGRAFÍA.**

ADAC / FIA Foundation - EcoTest Testing and Assessment Protocol Release 2.0, 2013.

Agencia Andaluza de la Energía. La biomasa en Andalucía. 2011.

Agencia Internacional de la Energía, 2007. <http://www.iea.org/techno/essentials5.pdf>

Agencia Internacional de la Energía, 2013.

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf>

Agnolucci Paolo, 2007. Hydrogen infrastructure for the transport sector. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 3526-3544

Air products, 2013. [http://www.airproducts.co.uk/bulkgases/hydrogen\\_equipment.htm](http://www.airproducts.co.uk/bulkgases/hydrogen_equipment.htm)

Ajanovic A. On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. International Journal of Hydrogen Energy; 2008: 4223-34.

Argonne National Laboratory, 2009 Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications. [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/cryo\\_compressed\\_auto.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/cryo_compressed_auto.pdf)

Asensio Paloma, "Hidrógeno y pila de combustible". Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Asociación Española del Hidrógeno, 2013 (1).

[http://www.aeh2.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=4&Itemid=41&lang=es](http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=4&Itemid=41&lang=es)

Asociación Española del Hidrógeno, 2013 (2).

[http://www.aeh2.org/images/stories/AEH2/Genera2013/130227\\_ariema\\_mercadosh2.pdf](http://www.aeh2.org/images/stories/AEH2/Genera2013/130227_ariema_mercadosh2.pdf)

Balat Haava, Kirtay Elif. Hydrogen from biomass e Present scenario and future prospects. International journal of hydrogen energy 35 (2010) 7416-7426.

Barral Katia, Barthélémy Hervé. Hydrogen high pressure tanks storages: overview and new trends due to H2 Energy specifications and constraints. WHEC 16 / 13, 16 June 2006 .Lyon France.

Barthel, Leif-Patrik. Cost Analysis of Hydrogen Infrastructure in Europe. University of Stuttgart.

Bevilacqua, Knight. Bringing fuel cell vehicles to market-scenarios and challenges with fuel alternatives. West Sacramento, CA: California Fuel Cell Partnership, 2001.

Borup Rod, Meyers Jeremy, Pivovar Bryan, Seung Kim Yu, Mukundan Rangachary, Garland Nancy, et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation. Chem. Rev. 2007; 107:3904-51.

Brey J.J., Carazo A.F., Brey R. Using AHP and binary integer programming to optimize the initial distribution of hydrogen infrastructures in Andalusia. International Journal of hydrogen energy 37 (2012) 5372-5384.

Cai Mei, Ruthkosky Martin S, Belabbes Merzougui, Swathy Swathirajan, Balogh Michael P, Oh Se H. Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts. Journal of Power Sources 160; 2006:977-986.

California Fuel Cell Partnership. "Well to Wheels: A Guide to understanding Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions", 2009.

California Hydrogen Highway Network (CHHN). Economic team report. West Sacramento, CA: California 2010 Hydrogen Highway Network, 2005.

CDTI, SERNAUTO, TECNOEBRO, 2009. Spanish Capabilities in the Eco-electro Road Mobility Sector and the FP7 Green Cars Initiative.

Ciemat, 2013.

<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/biocarburantes/001.htm>

Colella WG., Jacobson MZ., Golden DM. Switching to a US hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. Journal of Power Sources; 2005:150-81.

Daimler AG, 2013. [http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user\\_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende\\_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Joerg\\_Wind\\_Daimler.pdf](http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Joerg_Wind_Daimler.pdf)

Department of Energy. United States of America. Hydrogen and fuel cell activities, progress, and plans. Report to Congress. January 2009.

Department of Energy. United States of America, 2011.

[http://www.autonomie.net/publications/fuel\\_economy\\_report.html](http://www.autonomie.net/publications/fuel_economy_report.html)

Department of Energy. United States of America. 2011 Fuel Technologies Market Report. July 2012.

Dirección General de Tráfico, 2011.

[http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seuridad\\_vial/estadistica/parque\\_vehiculos/series\\_historicas\\_parque/series\\_historicas\\_parque\\_vehiculos.pdf](http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seuridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/series_historicas_parque_vehiculos.pdf)

DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs.

DOE, U.S. Department of Energy, 2013. Well to Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles.

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13005\\_well\\_to\\_wheels\\_ghg\\_oil\\_ldvs.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13005_well_to_wheels_ghg_oil_ldvs.pdf)

DOE, 2013 (1). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/freedomcar\\_targets\\_explanations.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/freedomcar_targets_explanations.pdf)

DOE, 2013 (2). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen\\_storage.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.html)

DOE, 2013 (3). Hydrogen Storage.

[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech\\_status.html](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech_status.html)

DOE, 2013 (4). Hydrogen Storage.

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/storage.pdf>

DOE, 2013 (5). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mfg2011\\_plenary\\_leavitt.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mfg2011_plenary_leavitt.pdf)

Eaves S., Eaves J. A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. *J Power Sources* 2004;130:208-12.

Edwards R., Larivé J-F., Beziat J-C. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-Wheels report version 3c, July 2011.

JRC Scientific and Technical Reports. EURO 24592 EN-2011.

Energía y cambio climático. SET-TE: producción de hidrógeno.

[http://www.energiaycambioclimatico.com/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_H2.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_H2.pdf)

EPA, 2013. Fuel Economy Labels in EPA and DOT Final Rulemaking “Revisions and Additions to Motor Vehicle Fuel Economy Label”

<http://www.epa.gov/otaq/carlabel/fealllabels.pdf>

Ernst & Young. An economic analysis of various hydrogen fuelling pathways from a Canadian perspective. Ottawa, Ontario: Natural Resources Canada, 2005.

European Commission 2013 (1).

[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/air\\_pollution/mi0046\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/mi0046_es.htm)

European Commission 2013 (2).

[http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm)

European Expert Group on Future Transport Fuels. Future Transport Fuels, January 2011.

FITSA, IDAE, 2008. Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: situación y perspectivas para automoción.

Florida Solar Energy Center, 2013.

<http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/storage.htm>

Frano Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice.

Fuel cell technology Handbook. Edited by Gregor Hoogers. ISBN 0-8493-0877-1, 2003.

Gielen D, Simbolotti G. Prospects for hydrogen and fuel cells. París: International Energy Agency (IEA): 2005.

GM, 2013 (1). [http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/geneva\\_2006/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/geneva_2006/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)

GM, 2013 (2). Gregory Hoogers. Fuel Cell Technology Handbook.

GM, 2013 (3). 2010 Fuel Cell Technologies market report. Junio 2011. U.S.

Department of energy. Energy Efficiency & Renewable Energy

González García-Conde, A. El hidrógeno como vector energético y su aplicación al transporte. Salón del Vehículo y Combustible Alternativos. Valladolid, 2011.

González García-Conde, A. Hidrógeno y pilas de combustible. Aranjuez, 2010.

González García-Conde, A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno.

Asociación Española del Hidrógeno.

<http://www.udg.edu/LinkClick.aspx?fileticket=qifUssA0Vxs%3D&tabid=8702&language=ca-ES>

Granovskii M., Dincer I., Rosen MA. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. J. Power Sources 2006; 159:1186-93.

Greene DL, Leiby PN, James B., Perez J., Melendez M., Milbrant A., et al. Analysis of the transition to hydrogen fuel cell vehicles & the potential hydrogen energy infrastructure requirements. ORNL/TM-2008/30; March 2008.

Gutiérrez Jodra, Luis. El Hidrógeno, combustible del futuro. Rev. E. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp). Vol. 99, nº 1, pp 49-67, 200 (2005).

Guvelioglu Galip H., Stenger Harvey G. Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources; 2005:95-106.

H2moves, 2013.

[http://www.hylights.org/publications/reports/hyLights\\_final\\_results/H2data\\_norwegian.pdf](http://www.hylights.org/publications/reports/hyLights_final_results/H2data_norwegian.pdf)

H<sub>2</sub> stations, 2013. <http://www.netinform.net/h2/H2Stations/Default.aspx>

Hiramitsu Y., Mitsuzawa N., Okada K., Hori M. Effects of ionomer content and oxygen permeation of the catalyst layer on proton exchange membrane fuel cell cold start-up. Journal of Power Sources; 2010:1038-45.

Honda, 2013 (1). <http://automobiles.honda.com>

Honda, 2013 (2). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/fcstack/evolution/>

Honda, 2013 (3). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/specifications/>

Honda, 2013 (4). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/operationalcapabilities/efficiency/>

Honda, 2013 (5). Flamborg S. et al. (2010). Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. DOT HS 811 267.NHTSA.

Honda, 2013 (6). <http://www.blogenergiasostenible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/>

- Honda, 2013 (7). <http://automobiles.honda.com/spanish/fcx-clarity/specifications.aspx>
- Hyundai, 2013 (1). [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)
- Hyundai, 2013 (2). [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)
- Hyundai, 2013 (3). [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_no\\_v\\_marcas/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_no_v_marcas/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)
- HyWays. HyWays: a European roadmap—assumptions and robust results from phase I report. Available at: <http://www.hyways.de>; 2006.
- IDAE, Asociación Española del Hidrógeno, 2008. ¿A partir de qué fuentes de energía se obtendrá el Hidrógeno?
- IDAE, FITSA. “Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: Situación y perspectivas para automoción”, 2008.
- IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera). Aprovechamientos Energéticos de Cultivos Leñosos. 2009.  
[http://www.uhu.es/6jornadasforestales/descargas/pdf/ArmandoMartinez\\_AprovEnergeticos.pdf](http://www.uhu.es/6jornadasforestales/descargas/pdf/ArmandoMartinez_AprovEnergeticos.pdf)
- International Energy Agency. Hydrogen production and storage. R&D priorities and gaps, 2006.
- Jacobson MZ., Colella WG, Golden DM. Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. Science 2005;308;1901-5.
- Jiao Kui, Li Xianguo. Cold start analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:5077-94.
- Jinfeng Wu, Xiao Zi Yuan, Martin Jonathan J, Haijiang Wang, Jiujun Zhang, Jun Shen, et al. A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies. Journal of Power Sources 2008; 184:104-19.
- Johnson N, Yang C, Ogden J. Build-out scenarios for implementing a regional hydrogen infrastructure. In: Proceedings for the national hydrogen association (NHA) annual conference, Long Beach, CA, March 2006.
- Kirtay Elif. Recent advances in production of hydrogen from biomass. Energy Conversion and Management 52 (2011) 1778-1789.
- km77, (2013). <http://www.km77.com/marcas/mercedes/necar5/sumario1.asp>
- Kromer M. and Heywood J. “Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet”. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. Report LFEE 2007-03RP, MIT, May, 2007.
- LBST. “Prospectiva Alternativa Mundial de Energía 2005”.
- L.B. Systemtechnick, 2005.  
[http://www.lbst.de/ressources/docs2006/Posibilidades\\_H2\\_Automocion\\_27OCT2005\\_FINAL.pdf](http://www.lbst.de/ressources/docs2006/Posibilidades_H2_Automocion_27OCT2005_FINAL.pdf)

Lee JY, Yoo M, Cha K, Lim TW, Hur T. Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel. Int J Hydrogen Energy 2009; 34:4243-55.

Leiby PN, Greene DL, Bowman D, Tworek E. Systems analysis of the hydrogen transition with HyTrans. Transport Research Board of the National Academies 85th Annual Meeting CD-ROM, 2005.

López Peña, Antonio. "Análisis de sensibilidad de los parámetros que determinan la logística de distribución para el suministro de hidrógeno en automoción. Tesis doctoral de Antonio López Peña. Universidad de Zaragoza, Grupo de Transporte e Investigación Logística (GITEL) año 2008.

Maranzana Gael, Moyne Christian, Dillet Jerome, Didierjean Sophie, Olivier Lottin. About internal currents during start-up in proton exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources; 2010;195(18):5990-5.

Matsunaga M., Fukushima T., Ojima K. "Powertrain system of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle". EVS24 Stavanger, Noruega, Mayo 2009. World Electric Vehicle Journal Vol. 3 - ISSN 2032-6653.

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis.The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Mercedes-Benz, 2013 (1). <http://washingtonfuelcellsummit.com/proceedings/mobile1-simon.pdf>

Mercedes-Benz, 2013 (2). <http://blogs.km77.com/teletransporte/5994/mercedes-benz-clase-b-f-cell-tecnica-y-graficos/>

Mercedes-Benz, 2013 (3). <https://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1401156-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0.html>

Mercedes-Benz, 2013 (4). [http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric\\_car](http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric_car)

Mercedes-Benz, 2013 (5). <http://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/pdfmb/green-f-cell.pdf>

Michelle Berry Irene. "The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of U.S. Light-Duty vehicles. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

Minetur, 2013.  
<http://www.minetur.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesMensuales/2013/Junio2013.pdf>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1).  
[http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/00ESPAÑA\\_tcm7-234252.PDF](http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/00ESPAÑA_tcm7-234252.PDF)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2).  
[http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/IEPNB\\_2011\\_19marzo\\_tcm7-264661.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/IEPNB_2011_19marzo_tcm7-264661.pdf)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2010 (3).  
[http://www.magrama.gob.es/ca/ministerio/servicios/publicaciones/H\\_Agricultura\\_tcm8-164933.pdf](http://www.magrama.gob.es/ca/ministerio/servicios/publicaciones/H_Agricultura_tcm8-164933.pdf)

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. La Energía en España 2011.

Mohtadi Rana, Matsunaga Tomoya, Heung Kit, Schumacher Ray, Wicks George. Hollow Glass Microspheres as Micro Media for Complex Metal Hydrides. 2011.

Moore RB, Raman V. Hydrogen infrastructure for fuel cell transportation. Int J Hydrogen Energy 1998;23:617–20.

Moreno J., Dufour J. Life cycle assessment of hydrogen production from biomass gasification. Evaluation of different Spanish feedstocks. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 7616-7622.

Mulder F, Girard J. Policy implications of the investment needs and economic viability. The Hague: SenterNovem; 2004.

Myers DB, Ariff GD, James BD, Kuhn RC. Hydrogen from renewable energy sources pathway to 10 Quads For transportation uses in 2030 to 2050. Washington, DC: The Hydrogen Program Office of Power Technologies U.S Department of Energy, 2003.

National Hydrogen Energy Roadmap. United States Department of Energy, 2002.  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national\\_h2\\_roadmap.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national_h2_roadmap.pdf)

National Research Council, National Academy of Engineering (NRC/NAE), The hydrogen economy opportunities, cost, barriers, and R&D Needs. Washington, DC: National Academies Press; 2004.

Nicholas M. Hydrogen station siting and refueling analysis using geographic information systems: a case study of Sacramento county. Master's thesis University of California Davis, Davis, California; 2004.

Noriko Hikosaka Behling, Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs.

Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy 2010;38:24-9.

Ogden JM, William RH, Larson ED. Societal lifecycle cost comparison of cars with alternative fuels/engines. Energy Policy 2004;32:7-27.

Parlamento Europeo, 2013.

[http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact\\_sheets/info/data/policies/environment/article\\_7297\\_es.htm](http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact_sheets/info/data/policies/environment/article_7297_es.htm)

Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. Experimental and theoretical investigations on a proton Exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures. Journal of Power Sources; 2009:80-8.

Pollet Bruno G., Stafell Iain, Shang Jin Lei. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. ELECTROCHEMICAL SCIENCE AND TECHNOLOGYState of the Art and Future. Volume 84, December 2012, Pages 235-242.

Quantum,2013. [www.qtww.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php](http://www.qtww.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php)

Ramage MP, Chair, Committee on the Assessment of Resource Needs for Fuel Cell and Hydrogen Technologies, Transitions to Alternative Technologies –A focus on Hydrogen, National Research Council of the National Academies, Washington, DC, 2008. [http://books.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12222#toc](http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=12222#toc)

Red Eléctrica Española. <http://www.ree.es/>

Roadmap 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, 2010. [http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1\\_fullreport\\_PressPack.pdf](http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf)

Roads2HyCom Hydrogen and Fuel Cell Wiki, 2013. Hydrogen Pathway: Cost Analysis. Document Tracking ID 5029. 2013.

Smitha B., Sridhar S., Khan A.A., "Solyd polymer electrolyte membranes for fuel cell applications – a review. Journal of membrane science 259 (2005) 10-26.

Stedt M.T., Sheriff S.A., Veziroglu T.N. y Sheffield J.W. An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 1: pp. 565-576, 1998.

Stefano Campanari, Giampaolo Manzolini, Fernando Garcia de la Iglesia. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations, Journal of Power Sources, October 2008.

Stephens-Romero S., Carreras-Sospedra M., Brouwer J., Dabdub D., Samuelsen S. Determining air quality and greenhouse gas impacts of hydrogen infrastructures and fuel cell vehicles. Environ Sci Technol 2009; 43:9022-9.

Susmozas Ana, Iribarren Diego, Dufour Javier. Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 9961-9972.

TES/LBST, 2013.

<http://www.hysafe.org/science/eAcademy/docs/1stesshs/presentations/HyApproval.pdf>

Thomas CE, (1). Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles, International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296.

Thomas CE, (2). Fuel cell and battery electric vehicles compared. International Journal Hydrogen Energy 2009;34:6005-20.

Thomas CE, (3). Hydrogen-fueled vehicles: hybrids vs. fuel cells. Presented to the International Vehicle Technology Symposium. 2003.

Toyota, 2013 (1). [http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept\\_cars-fchv/index.tmex](http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept_cars-fchv/index.tmex)

Toyota, 2013 (2). <http://www.bloomberg.com/news/2010-05-06/toyota-targets-50-000-range-for-hydrogen-powered-sedan-planned-by-2015.html>

Toyota, 2013 (3). <http://www.toyotaaruba.com/toyota/readBlob.do?id=134>

Toyota, 2013 (4). [http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota\\_NHA\\_keynote\\_2010.pdf](http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota_NHA_keynote_2010.pdf)

Toyota, 2013 (5). [https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo-/html/prelogin/docs/fchv\\_adv\\_erg.pdf](https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo-/html/prelogin/docs/fchv_adv_erg.pdf)

Toyota, 2013 (6). [http://pressroom.toyota.com/article\\_display.cfm?article\\_id=2388](http://pressroom.toyota.com/article_display.cfm?article_id=2388)

Tran Doanh, Cummins Michael. "Development of the Jeep Commander 2 Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle". SAE technical paper series 2001-01-2508.

UNICAMP, 2013.

<http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Hidrogeno%2010-07/AGonz%C3%A1lez.pdf>

Universidad de Sevilla. Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.

US Department of Energy, 2013. [http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_sbs.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml)

U.S. Department of Energy, 2013 (1). <http://www.fueleconomy.gov/feg/fuelcell.shtml>

U.S. Department of Energy, 2013 (2). <http://www1.eere.energy.gov/-hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/production.pdf>

US Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and The FreedromCAR and Fuel Partnership, 2009. Targets for Onboard Hydrogen Storage Systems for Light-Duty Vehicles.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/pdfs/targets\\_onboard\\_hydro\\_storage\\_explanation.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/pdfs/targets_onboard_hydro_storage_explanation.pdf)

Veziroblus and Sheffield J.W. An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. M.T.Syed, S.A. Sherif, T.N. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. I: pp. 565-576, 1998.

Veziroglu Ayfer, Macario Rosario. Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011).

Villalonga S., Nony F., Magnier C., Yvernes J.L., Thomas C., Delmas B., Mazabraud P.. Composite 700 bar-vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage.

Wang M, Mintz M, Singh M, Stork K, Vyas V, Johnson L. Assessment of PNGV fuels infrastructure, phase 2-final report: additional capital needs and fuel cycle energy and emissions impacts. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research and Decision and Information Sciences Division, 1998.

Wang MQ. GREET 1.5 e Transportation Fuel-Cycle Model:Volume 1: Methodology, Development, Use, and Results. Report ANL/ESD-39 from Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory for Office of Transportation Technologies, US Department of Energy, August 1999.

Weinert JX. A near-term economic analysis of hydrogen fueling stations. Davis: Institute of Transportation Studies, University of California 2005.

White Paper 2011 “Roadmap to a Single Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system”.

Wilson John R. Hydrogen storage technologies, for transportation, auxiliary power generation and military applications. July 2011.

Wu Jinfeng, Zi Yuan Xiao, Martin Jonathan J, Wang Haijiang, Zhang Jiujun, Jun, Shen, Wu Shaohong, Merida Walter. A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies. Journal of Power Sources 2008; 184:104-19.

Wu Jinfeng, Martin Jonathan J, Orfino Francesco P, Wang Haijiang, Legzdins Colleen, Yuan Xiao-Zi, Sun Colin. In situ accelerated degradation of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell: part I: effect of elevated temperature and flow rate. Journal of Power Sources; 2010: 1888-94.

Yang C, Ogden J. Analyzing natural gas based hydrogen infrastructure—optimizing transitions from distributed to centralized H<sub>2</sub> production. In: Proceedings of National Hydrogen Association Conference. Washington, D.C., March 29–April 1, 2005.

Yongiling Sun, Joan Ogden, Mark Delucchi. Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles. International Journal of hydrogen energy 35 (2010) 11932-11946.

Zhao Hengbing, Burke Andrew. “Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors: Device Characteristics Control Strategies, and Simulation Results. Research report UCD-ITS-RR-10-01, 2010. Institute of transportation studies, University of California.

Zhili Miao, Hogmei Yu, Wei Song, Lixing Hao, Zhigang Shao, Qiang Shen, et al. Characteristics of proton exchange membrane fuel cells cold start with silica in cathode catalyst layers. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:1-6.

## **ANEXOS**

**ANEXO I. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS  
DE PILA DE COMBUSTIBLE (1992-2012).**

**ANEXO I. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (1992-2012)**

Con el objeto de llevar a cabo un análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible durante los últimos 20 años, se ha obtenido información de distintas fuentes de internet, principalmente de páginas de varios fabricantes de vehículos, y se ha llevado a cabo un análisis bibliográfico. Una vez realizada la búsqueda de información, se ha elaborado una tabla que contiene un total de 262 vehículos, para ello se ha llevado a cabo un análisis de los vehículos de pila de combustible desarrollados, solamente se van a analizar los turismos ya que otros vehículos cómo pueden ser los “carritos” de golf son demasiados pequeños y el vehículo que realmente tendría repercusión es un utilitario o un autobús.

Dicha tabla recoge la evolución de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno en función del fabricante durante 20 años, desde 1992 hasta 2012.

Se han seleccionado los fabricantes que han realizado varios prototipos para comparar los modelos de un mismo fabricante y analizar su evolución. Dentro de cada fabricante, se han agrupado los vehículos que son del mismo tipo.

Una vez analizadas las distintas marcas que recoge la tabla, se observa que Daimler, General Motors, Honda, Hyundai y Toyota, son los fabricantes que han desarrollado más prototipos y por lo tanto se va a poder estudiar mejor la evolución de sus vehículos.

De la compañía **Daimler AG** (a partir de 1925 utiliza como marca-nombre Mercedes-Benz, por este motivo el texto se va a referir a dicho fabricante como Mercedes-Benz) se han recogido 25 vehículos de pila de combustible entre el año 1992 y el año 2012. De estos 25 vehículos se descartan tres, el Daimler F-CELL Roadster (2009) por tratarse de un vehículo vintage, del cual no está prevista su comercialización, y que es conducido por un joystick, el Energy-G-Force (2012) y el Jeep Treo (2003) porque no se dispone mucha información sobre ellos. El resto de vehículos, se han agrupado en turismos y en furgonetas. Y dentro de los turismos se han comparado aquellos que son de la misma categoría. Se ha analizado la evolución del vehículo de pila de combustible de este fabricante (*Fig.1* y *Fig.2*).

## Mercedes-Benz Hydrogen Electric Vehicles

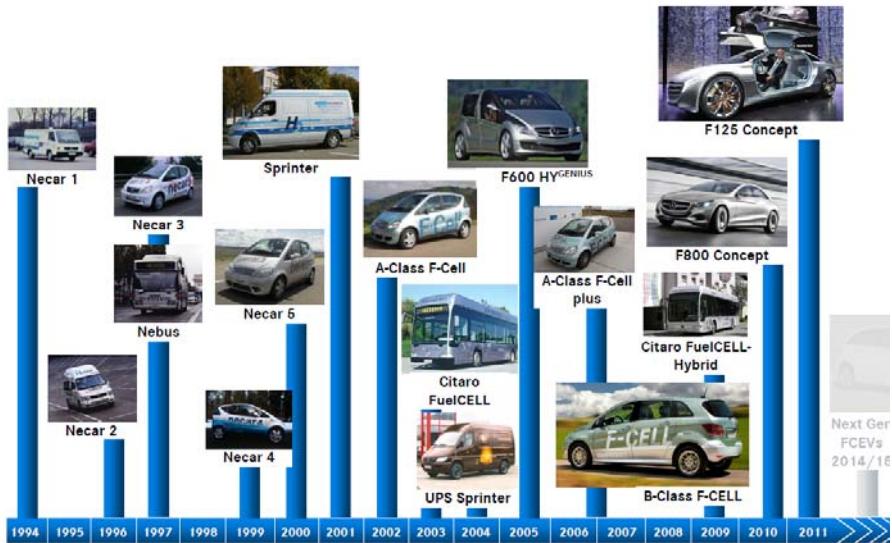


Fig.1. Evolución del vehículo de pila de combustible de Mercedes.

Fuente: **Mercedes-Benz, 2013 (1).**

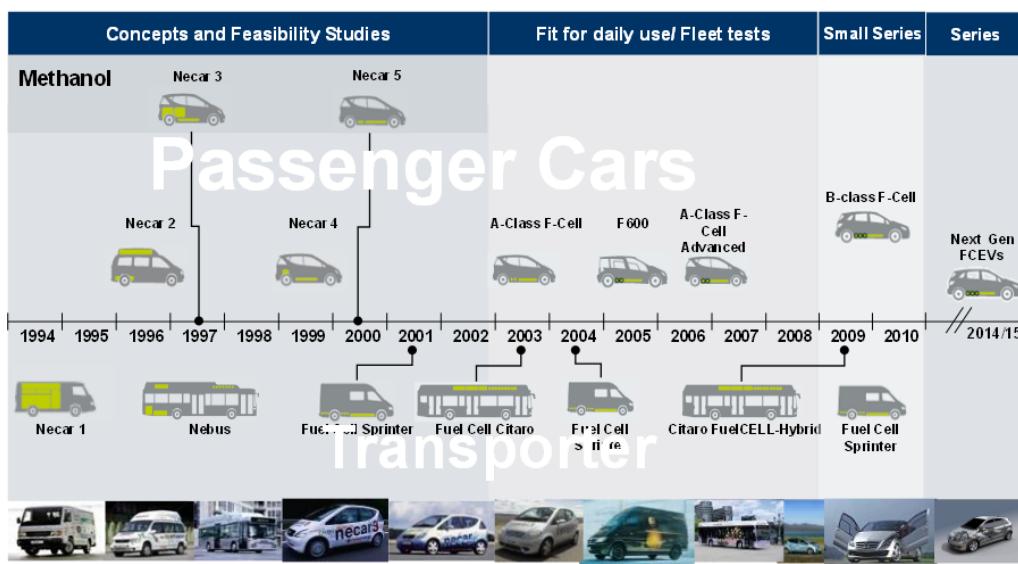


Fig.2. Evolución del vehículo de pila de combustible de Mercedes-Benz.

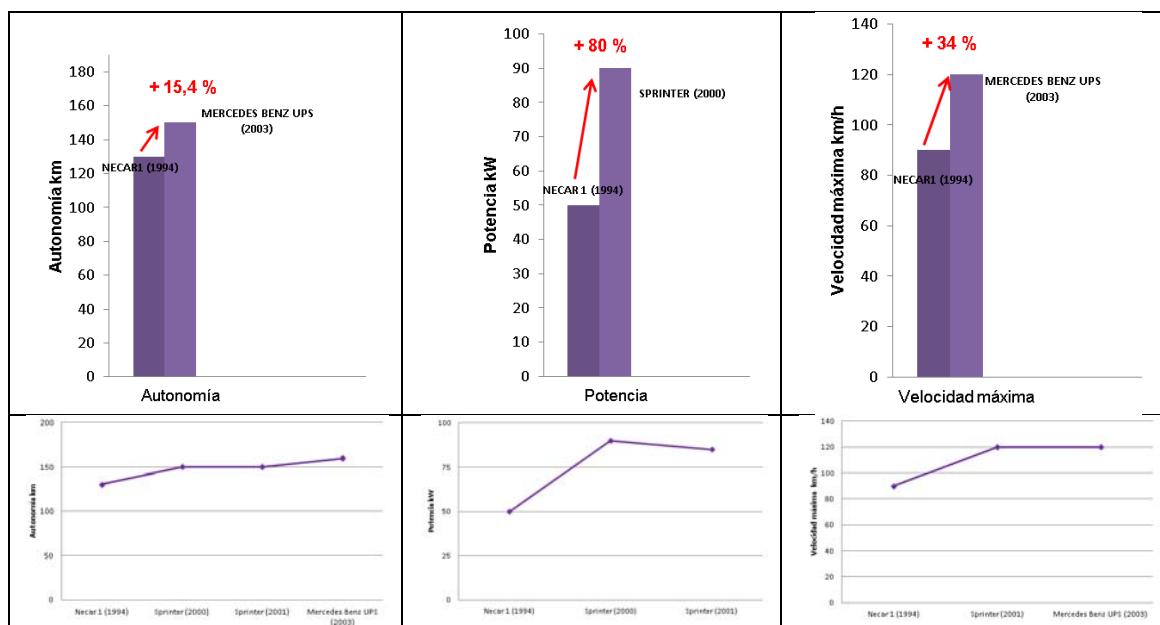
Fuente: **Daimler AG, 2013.**

Las furgonetas que se han analizado son: Mercedes Benz Sprinter UPS (2003), Sprinter (2001), Sprinter (proyecto W.E.I.T) (2000) y NECAR 1 (180 Van) (1994). Para analizar la evolución que han experimentado este tipo de vehículos se ha estudiado cada uno de los campos y se observa que (Fig.3) :

- El motor de estos vehículos funciona exclusivamente con pila de combustible.
- Utilizan pila de combustible PEMFC (Pilas de combustible de membrana polimérica o de membrana de intercambio de protones). Tienen como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen

platino como catalizador, necesitan hidrógeno y utilizan aire como oxidante. Estas pilas se utilizan normalmente en el sector del transporte porque trabajan a bajas temperaturas y son ligeras.

- En cuanto al tamaño de la pila de combustible, el modelo NECAR 1 (1994) utilizaba una pila de 50 kW, mientras que modelos posteriores han utilizado pilas de 85 kW (Sprinter, 2001) y 90 kW (Sprinter, 2000). por lo que aumenta su potencia un 80% en unos 5 años.
- El fabricante de la pila de combustible en todos ellos es Ballard (en un modelo se desconoce el fabricante).
- Se observa que la autonomía ha aumentado pasando de 130 km a > 150 km (se ha incrementado un 15,4 %). Este aumento de autonomía se debe a que hay mayor compresión del hidrógeno (pasa de 300 bar a 350 bar) y a que aumenta la potencia de la pila de combustible.
- La velocidad máxima que pueden alcanzar ha pasado de 90 km/h a 120 km/h (se ha incrementado un 34 %).
- En cuanto al almacenamiento del hidrógeno, en todas las furgonetas analizadas se almacena como hidrógeno comprimido y se pasa de almacenar hidrógeno comprimido a 300 bar (30.000 KPa) en el modelo del año 1994 (NECAR 1) a almacenar hidrógeno comprimido a 350 bar en el modelo de 2001 (Sprinter).



Por otro lado también existe la serie F-Cell de Mercedes Benz, en la que se pueden encontrar dos versiones la clase A Fuel Cell que es la primera que aparece en el año 2002 y la clase B Fuel Cell cuyo último desarrollo es en el año 2009. Si se comparan ambas versiones para analizar su evolución, se observa lo siguiente (Fig.4):

- El motor de estos vehículos funciona con pila de combustible y batería.
- Utilizan pila de combustible PEMFC.
- El fabricante de la pila de combustible en todos ellos es Ballard.

- En cuanto al tamaño de la pila de combustible, la clase A (2002) utilizaba una pila de 85 kW, mientras que la clase B (2009) utiliza una pila de 100 kW, por lo que aumenta su potencia un 18% en 7 años.
- Se observa que la autonomía ha aumentado pasando de 150 km a 400 km (se ha incrementado un 166,7 %). La mejoría en autonomía se debe en parte a que la clase B dispone de más espacio para los depósitos de H<sub>2</sub> comprimido, así como a los avances en la tecnología de pila de combustible y de las baterías.
- La velocidad máxima que pueden alcanzar ha pasado de 145 km/h a 170 km/h (se ha incrementado un 17%).
- En cuanto al almacenaje del hidrógeno, en la clase A se almacenaba como hidrógeno comprimido a 350 bar y en la clase B aumenta la presión, ya que se almacena a 700 bar.
- La eficiencia del vehículo ha aumentado de 56 mpg<sub>equiv</sub><sup>\*</sup> (90,1 km/kg de hidrógeno, es decir, 1,11 kg H<sub>2</sub>/100 km ) a 0,97 kg H<sub>2</sub>/100 km.  
(mpg milla por galón, hay que tener en cuenta que 1 kilogramo de hidrógeno energéticamente equivale a 1 galón de gasolina (Fuente: US Department of Energy, 2013), por lo tanto 56 mpg es lo mismo que 56 millas por kilogramo de hidrógeno, y convirtiendo las millas a kilómetros, 56 mpg es equivalente a 90,1 kilómetros/ kilogramo de hidrógeno).

\*mpg<sub>equiv</sub>: mpg gas equivalente está basado en la equivalencia energética: 1 kg. Hidrógeno= 1 galón de gasolina.

La mejoría del rendimiento del Mercedes clase B Fuel Cell con respecto a la clase A Fuel Cell resulta considerable. La potencia del motor eléctrico ha pasado de 85 a 100 kW, y la capacidad del tanque de hidrógeno, la presión y la autonomía prácticamente se han duplicado.

Según el fabricante este vehículo no pierde ninguna de las cualidades del Mercedes Clase B convencional, indicando que el volumen del maletero se ha visto reducido de 544 a 416 litros ya que el depósito de hidrógeno va colocado entre los asientos traseros y el maletero.

El fabricante también afirma que el consumo es de aproximadamente 1 kg de hidrógeno cada 100 kilómetros, lo que equivale a 3,3 litros de gasóleo / 100 km.

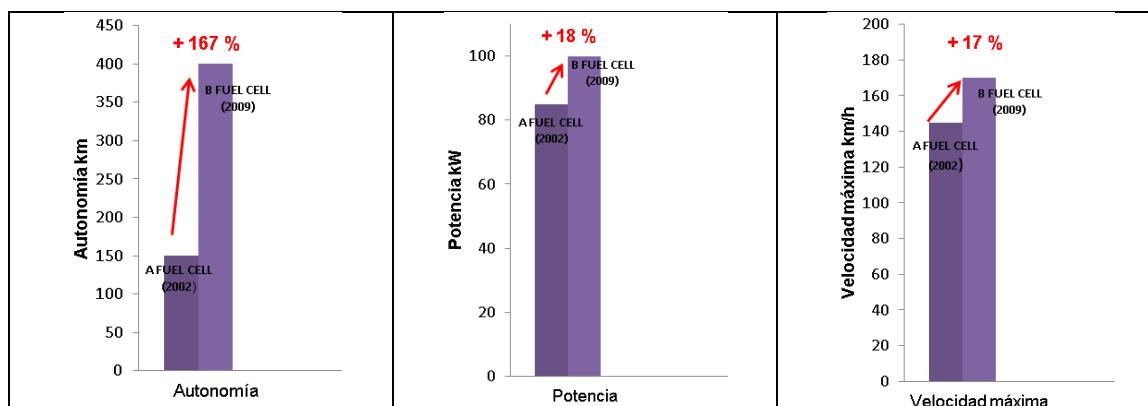
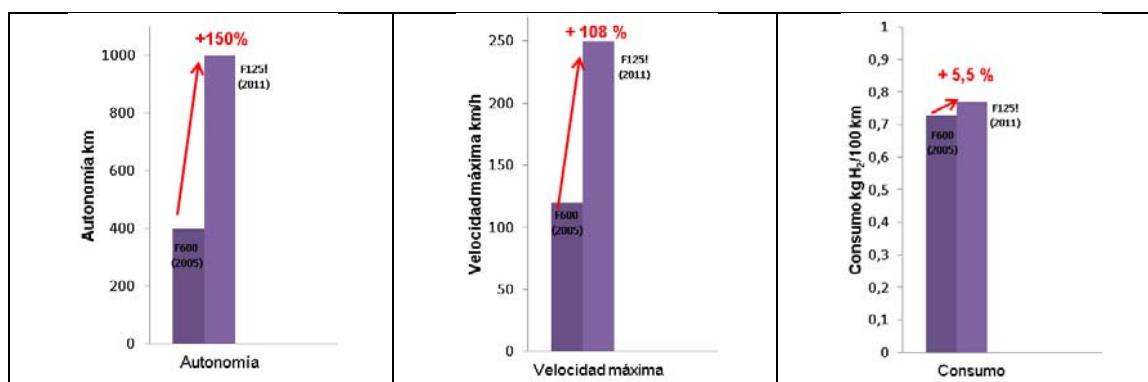


Fig.4. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.

Mercedes Benz tiene una serie de vehículos que llama “prototipos experimentales” dentro de los cuales se encuentran algunos que utilizan el hidrógeno como combustible, estos vehículos son: F100 (1991), F600 Hygenius (2005), F800 (2010) y F125!(2011). Del primero de ellos no se dispone mucha información, pero si se hace una comparativa de los restantes se observa que sus prestaciones han ido mejorando notablemente (*Fig.5*):

- El motor de estos vehículos funciona con pila de combustible y con batería.
- En cuanto al tipo de pila, solamente se tiene datos del F600 Hygenius que utiliza una pila PEMFC de 60 kW.
- La autonomía ha aumentado pasando de 400 km (F600 Hygenius) a 629 km (600 km con hidrógeno +29 km con batería) (F800) y a 998 km (952 km con hidrógeno +46 km con batería) (F125!). Por lo tanto la autonomía se ha incrementado casi un 150 %.
- La velocidad máxima también se ha incrementado de 120 km/h a 250 km/h.
- En todos los casos se almacena hidrógeno comprimido aunque no se especifica la presión.
- En cuanto a la eficiencia y al consumo, el F600 Hygenius consume 2,9 litros de gasolina equivalente cada 100 km, es decir, 0,76 kg de H<sub>2</sub> cada 100 km (*Según la siguiente equivalencia energética: 1 kg H<sub>2</sub> = 1 galón de gasolina= 3.7854 litros de gasolina equivalente*). Mientras que el F 125! consume 80 mpg<sub>equiv</sub> (0,77 kg H<sub>2</sub> cada 100 km), es decir que consume un poco más.

Dentro de la serie G se encuentran el Ener-G-Force (2012), el Jeep Treo (2003), el Jeep Commander 2 (2000) y el Jeep Commander (1998). Comparando los datos de los que se dispone se puede observar que funcionan con pila de combustible y batería, y que el tamaño de la pila se ha incrementado de 30 kW (Jeep Commander) a 50 kW (Jeep Commander 2). El Jeep Commander 2 (2000) utiliza metanol reformado con vapor de agua (*Tran D. et al., 2001*).



*Fig.5. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.*

Por último se ha realizado una comparativa de todos los NECAR (New Electric CAR) que ha fabricado Daimler (*Fig.6* y *Fig.7*). El NECAR1 (1994) es una furgoneta. El sistema de pila de combustible era bastante compacto y pesaba 800 kg pero todavía era muy voluminoso y funcionaba con hidrógeno. El sistema de pila de combustible está formado por 12 unidades, con una potencia nominal total de 50 kW. El depósito de combustible contenía 150 litros de hidrógeno comprimido a 300 bares, adecuado para una autonomía de unos 130 km y la velocidad máxima que alcanzaba eran 90 km/h. En este modelo la autonomía y la velocidad tenían valores todavía bajos. Los siguientes objetivos fueron reducir el tamaño del sistema de pila de combustible, aumentar la eficiencia.

El siguiente fue el NECAR2 (1996) que tenía dos pilas de combustible que generaban una potencia total de 50 kW. Disponía de dos depósitos de hidrógeno que contenía cada uno 140 litros colocados debajo del techo. La velocidad máxima que alcanzaba eran 110 km/h y la autonomía 250 km.

En lugar de 12 pilas tenía 2 pilas de 150 celdas cada una pero conseguían la misma potencia. Este modelo redujo el tamaño y el volumen del sistema de pila de combustible, pesando ahora 270 kg, una tercera parte que el sistema de NECAR1.

El siguiente modelo fue el NECAR3 (1997), fue el primer sistema de pila de combustible en el mundo que incorporaba la producción de hidrógeno a bordo. Utilizaba metanol como combustible y era necesario un reformador para producir el hidrógeno. El reformador necesitaba mucho espacio, por lo que se planteó la necesidad de reducir su tamaño. Al igual que el NECAR2 tenía dos pilas de combustible formadas por 150 celdas cada una y generaban una potencia total de 50 kW. Trabajaba a 80°C de temperatura. El depósito era de 38 litros y proporcionaba una autonomía de 400 km y tenía una velocidad máxima de 120 km/h.

El NECAR4 (1999) fue el siguiente modelo con una autonomía de 450 km y una velocidad máxima de 145 km/h. Tenía dos pilas de combustible de 160 celdas cada una y generaban una potencia total de 70 kW, un 40% más que su predecesor. Este vehículo utilizaba hidrógeno líquido (-253°C) almacenado en un depósito de 100 litros. El hidrógeno líquido tiene que pasar a gaseoso para poder ser utilizado en las pilas de combustible.

El siguiente modelo fue el NECAR4a (advanced) (2000), a diferencia del anterior trabaja con hidrógeno comprimido. También tiene una velocidad máxima de 145 km/h. El sistema de pila de combustible está formado por una única pila que genera 75 kW, reduciéndose su tamaño a la mitad y el peso a la tercera parte. Tiene tres depósitos de hidrógeno de 140 litros cada uno, que almacenan hidrógeno a 350 bares. Los aproximadamente 2 kg de hidrógeno son suficientes para una autonomía de 200 km.

A continuación apareció el NECAR 5 (2000), también es alimentado por metanol al igual que el NECAR3 pero se reduce a la mitad el tamaño del reformador y su peso también se ve reducido considerablemente. Tiene una autonomía de 450 km y una velocidad de 150 km/h, con un depósito de 45 litros. Este vehículo pesa 300 kg menos que el vehículo NECAR3. La pila de combustible genera 85 kW.

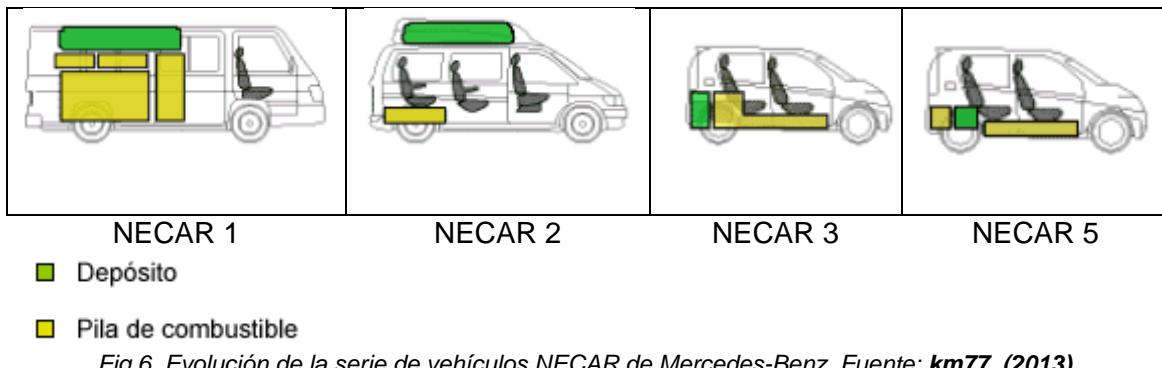


Fig.6. Evolución de la serie de vehículos NECAR de Mercedes-Benz. Fuente: km77, (2013).

Y la serie de NECAR la cierra el NECAR5.2 en 2001 aumentando la autonomía de su predecesor a 482 km.

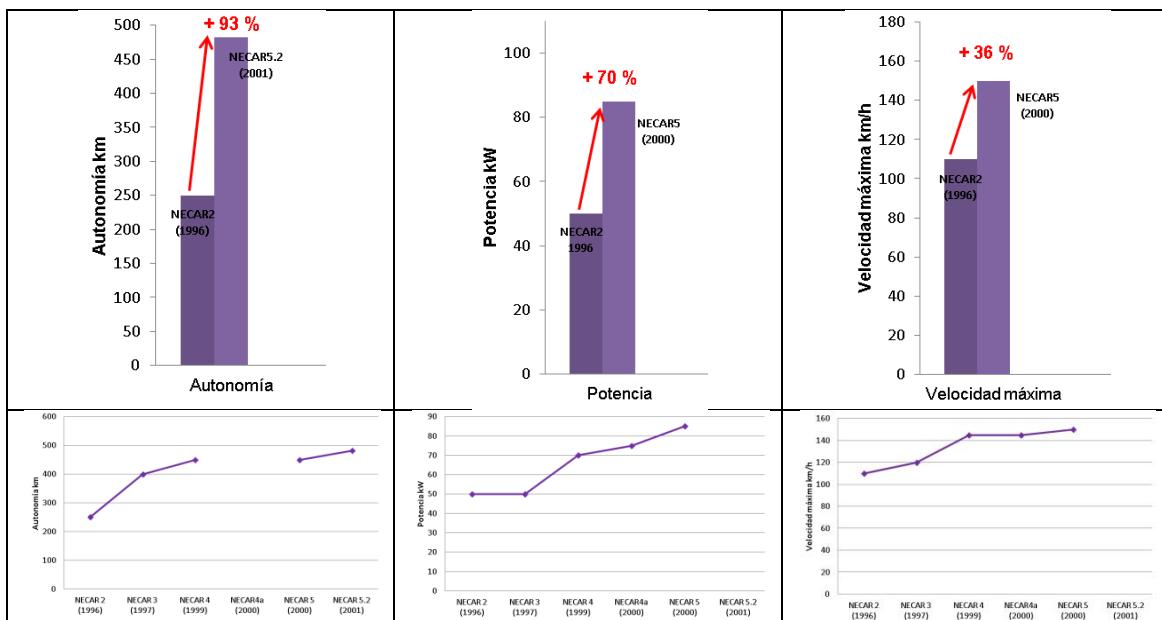


Fig.7. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.

Del fabricante **General Motors** se han recogido un total de 21 vehículos de pila de combustible entre el año 1992 y el año 2012. De estos 21 vehículos se descartan algunos a la hora de hacer un estudio en profundidad y realizar una comparativa. Los vehículos que no se van a comparar son el Precept (2000), el AUTONomy (2002), el Hy-wire Proof (2002), el Chevrolet Volt (2007) y el Cadillac Provoq (2008), por tratarse de vehículos conceptuales y no tener bastante información para poder analizarlos y realizar una comparación con el objeto de estudiar su evolución. Por otro lado también se descartan el Chevy S-10 (2001) y el Chevrolet Silverado Military Truck (2005) por tratarse de camiones y el FC EV1 por tratarse de un vehículo de pila de combustible que se basa en un vehículo eléctrico al que se le añade una pila de combustible que utiliza metanol reformado como combustible, por lo que no puede compararse con algún otro vehículo.

Dentro de los distintos modelos de vehículos de pila de combustible que tiene GM, se puede observar que muchos de ellos se desarrollan a partir de la mono-volumen Opel Zafira, estos son: Zafira (mini-van) (1998), HydroGen1 (2000), HydroGen3 (2001), Advanced HydroGen3 (2002) e HydroGen3 liquid (2004).

Si se lleva a cabo una comparativa de estos vehículos se puede observar que sus prestaciones han ido mejorando notablemente (*Fig.8*):

- El motor de estos vehículos funciona con pila de combustible o con pila de combustible y batería.
  - En cuanto al tipo de pila se observa que el primer modelo (Zafira mini-van 1998) utilizaba una PEMFC de Ballard mientras que el resto ya utilizan una pila PEMFC desarrollada por GM.
- En la *Tabla 1* se observa la evolución de la pila de combustible de GM, en la que se puede observar que ha ido aumentando la cantidad de potencia producida por litro (densidad de potencia).
- La autonomía ha permanecido constante (400 km).
  - La velocidad máxima se ha incrementado de 120 km/h a 160 km/h (incremento del 33%).
  - En cuanto al combustible utilizado, salvo el primer prototipo (1998) que utilizaba metanol y el advanced HydroGen3(2002) que utilizaba hidrógeno comprimido, el resto utiliza como combustible hidrógeno líquido.

*Tabla 1. Evolución de la pila de combustible de GM. Fuente: Fuel Cell Technology Handbook, 2003.*(Datos obtenidos de Opel y de la página web sobre Fuel Cell Today and General Motors).

Pila	Gen3	Gen4	Gen7	Pila 2000	Pila 2001
Año de desarrollo	1997	1998	1999	2000	2001
Potencia (kW)	37-41	23-40	80-120	94-129	102-129
Densidad de potencia (kW/l)	0.26	0.77	1,10	1,60	1,75
Potencia específica (kW/kg)	0.16	0.31	0,47	0,94	1,22
Celdas	220	106	200	200	640
Área activa (cm <sup>2</sup> )	500	500	800	800	-
Presión (bar)	2,8	2,7	2,7	1,5-2,7	-
Temperatura (°C)	80	80	80	80	-
Dimensiones (mm)	-	-	590x270x500	472-251-496	
Otras especificaciones	-	-	-	No humidificación externa	No humidificación externa
Utilizada en	-	1998 Zafira	HydroGen1	HydroGen3	-

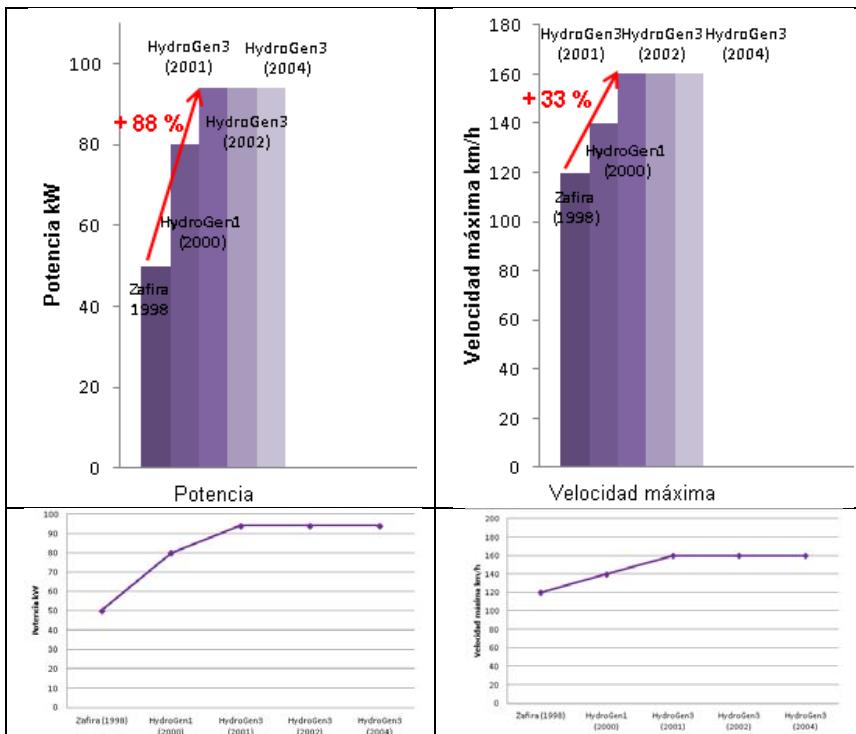


Fig.8. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: **Elaboración propia.**

Dentro del fabricante GM también se encuentran el Chevrolet Equinox (2006) el cuál tiene una autonomía de 320 km alcanzando una velocidad máxima de 161 km/h, y el Hydrogen4 que es la versión europea del anterior, y por lo tanto tiene las mismas características.

Del fabricante **Honda** se han recogido 14 vehículos de pila de combustible entre el año 1992 y el año 2012. De estos 14 vehículos se descartan seis para el análisis, el FCX Concept (1999), el Kiwami (2003) y el Puyo (2007) por tratarse de “vehículos concepto” (aquejados fabricados para mostrar una nueva tecnología o una nueva línea de diseño) y no tener bastante información para poder analizarlo, también se descartan el Acura FCX 2020 (2007) y el Honda DC Sport (2008) por tratarse de vehículos que se encuentran en la fase de estudio de diseño. Tampoco se analiza el FCX (2006) por ser un concepto que después dará lugar al FCX Clarity.

Honda es el fabricante que obtiene la primera certificación para un vehículo de pila de combustible de la Environmental Protection Agency (EPA) y de la California Air Resources Board (CARB) en Estados Unidos; que obtiene el primer leasing de un vehículo de pila de combustible (2002); y el primero en entregar un vehículo de pila de combustible a un cliente particular (2008). (Fuente: **Honda, 2013 (1)**)

La familia de vehículos Honda FCX (Fuel Cell eXperimental) comienza con el lanzamiento del primer prototipo (FCX-V1) en 1999 con una potencia de 60 kW. En este caso el combustible es hidrógeno que está almacenado en hidruro metálico. En el mismo año se lanza el prototipo FCX-V2 cuya diferencia principal con el anterior es que utiliza como combustible metanol, utilizando para ello un reformador. En el año 2000 aparece el FCX-V3, la tercera evolución del Fuel Cell eXperimental Vehicle con

el que se empiezan a hacer ensayos por carretera en California. Utiliza una pila PEMFC que produce 62 kW, en este caso no utiliza reformador de metanol y utiliza hidrógeno almacenado en un depósito de 100 litros a 25 MPa de presión. Como novedad este vehículo prescinde de batería (función auxiliar), en su lugar hay un condensador de alta capacidad. La ventaja de un condensador es que puede suministrar energía rápidamente (elevada potencia específica, almacena mucha energía en poco espacio), es decir, tanto la carga como la descarga puede ser instantánea.

Tiene un gran interés comparar las diferentes tecnologías en términos de almacenamiento de energía y capacidad de manejo de potencia. La gráfica Ragone (*Fig.9*) muestra estas tecnologías. Las líneas continuas muestran el estado actual de las distintas tecnologías y la línea discontinua muestra un estado futuro. Las líneas inclinadas indican la proporción entre la densidad de potencia y la densidad de energía (P/E) de las tecnologías, que permite informar sobre sus tiempos relativos de carga y descarga. Los condensadores de alta capacidad o supercondensadores pueden dar mucha potencia y cargarse en pocos segundos pero tienen una capacidad limitada de almacenamiento de energía. Por otro lado, las baterías de litio pueden almacenar 10-30 kWh y ser cargadas y descargadas completamente en 10-20 minutos, pudiendo proporcionar mucha potencia en pocos segundos como los condensadores pero con mayores pérdidas.

Las pilas de combustible de hidrógeno tienen una elevada densidad de energía, debido principalmente a las características del hidrógeno y puede generar elevada potencia durante largos períodos de tiempo, pero tiene una respuesta dinámica pobre debido a la necesidad de que el compresor proporcione aire en el cátodo de la pila de combustible. Por lo tanto, ninguna de las tecnologías cumple por sí sola, todas las necesidades de los vehículos de propulsión eléctrica. Teniendo en cuenta la necesidad de largo alcance entre el repostaje y la capacidad de hacer frente a los cambios rápidos en la demanda de potencia y la captura frecuente de energía de frenado, la combinación de las pilas de combustible y de los supercondensadores/baterías tienen ventaja frente a otras tecnologías y consiguen unos mejores rendimientos que los motores de combustión interna.

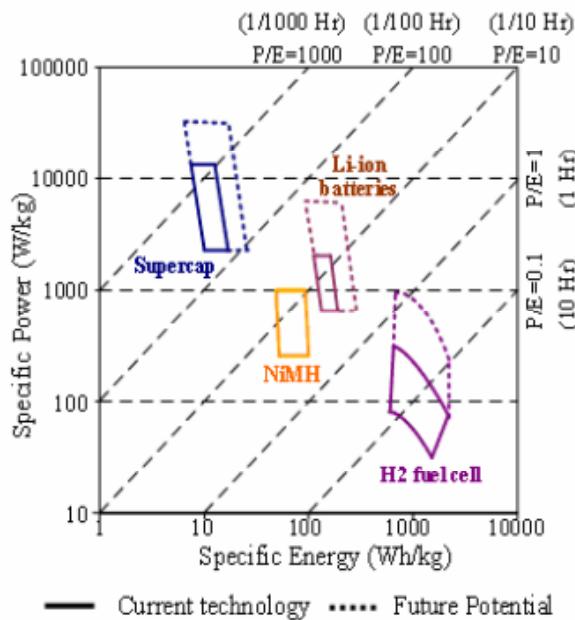


Fig.9. Gráfica Ragone de distintos métodos de almacenamiento de energía para aplicaciones en la automoción. Fuente: Zhao Hengbing et al., 2010.

En 2001 se lanza el FCX-V4, con este prototipo Honda reduce el tamaño de la pila de combustible y de sus componentes, desplazando los depósitos de hidrógeno y colocándolos debajo del suelo, de esta manera se dispone de mayor espacio para los pasajeros y para la carga en el maletero. Por otro lado, este prototipo incrementa la autonomía con respecto al anterior.

En el año 2002 el FCX de Honda es certificado por la California Air Resources Board (CARB) y la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (EPA). Siendo el primer y único automóvil de célula de combustible en la historia en ser aprobado para uso comercial. El FCX aumenta la capacidad del depósito de hidrógeno aumentando así su autonomía.

Honda desarrolla en 2003 una nueva generación de pila de combustible que le permite operar a bajas temperaturas (-20°C). Por lo que es en este año cuando el nuevo FCX de Honda, siendo el primer vehículo que utiliza una pila de combustible diseñada y fabricada por Honda, aumentando la potencia generada a 85 kW.

En el año 2006 aparece un concepto de vehículo del FCX que posteriormente va a dar paso al vehículo Honda FCX Clarity. Es el primer vehículo de célula de combustible de hidrógeno que tiene una plataforma exclusiva.

Utiliza como pila de combustible un nuevo modelo (Vertical Flow (V-Flow)) desarrollado por Honda, aumentando la potencia generada a 100 kW. Es una pila de menor tamaño lo que facilita su apilamiento. Es equivalente a un vehículo con certificación de la EPA (Environmental Protection Agency) de 61 mpg (60 millas por

kg= 96,5 km/kg H<sub>2</sub>), tiene una autonomía de hasta 240 millas (386,2 km) sin tener que recargar combustible\*. La certificación que obtiene de la EPA es vehículo de emisiones Nivel-2 y Almacenamiento-1 (TierII, Bin-1). Dentro de la norma Tier II hay 10 niveles Bin, siendo Bin1 el que corresponde a aquel vehículo con emisiones 0, es decir el más limpio.

En mayo de 2011, la agencia de protección ambiental de EE.UU. (EPA) y la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) rediseñaron las etiquetas de eficiencia de combustible que introdujeron hace ya 35 años, para tener en cuenta los nuevos combustibles. Estas nuevas etiquetas (*Fig.10*) se aplicarán para los modelos del año 2013 que estén a la venta. Dichas etiquetas proveerán información más completa sobre la eficiencia del combustible, el uso de la energía, los costes de combustible y los impactos ambientales de los vehículos. También ofrecen un código QR que permitirá a los usuarios de smartphones acceder a la información sobre cómo varios modelos de vehículos se comparan en cuanto a eficiencia de combustible y otros factores ambientales y energéticos.

EPA actualiza los métodos de ensayo para determinar la eficiencia de combustible que aparece en las etiquetas de todos los nuevos vehículos, comenzando por los vehículos del año 2008.

Hay una norma final para las revisiones de los niveles de eficiencia de combustible para los vehículos año-modelo 2013, publicada el 6 de julio de 2011. EPA y NHTSA están revisando la eficiencia de combustible y las etiquetas que aparecen en los vehículos nuevos a partir del año-modelo 2013. Los fabricantes de automóviles pueden adoptar voluntariamente las nuevas etiquetas a los vehículos del año modelo 2012.

Los vehículos se clasifican según la reglamentación de emisiones de la EPA, Tier II.

\*Cálculos de economía de combustible y promedio de recorrido basados en los datos de prueba de la EPA. La distancia de recorrido real variará en función de sus hábitos de manejo y mantenimiento del vehículo.

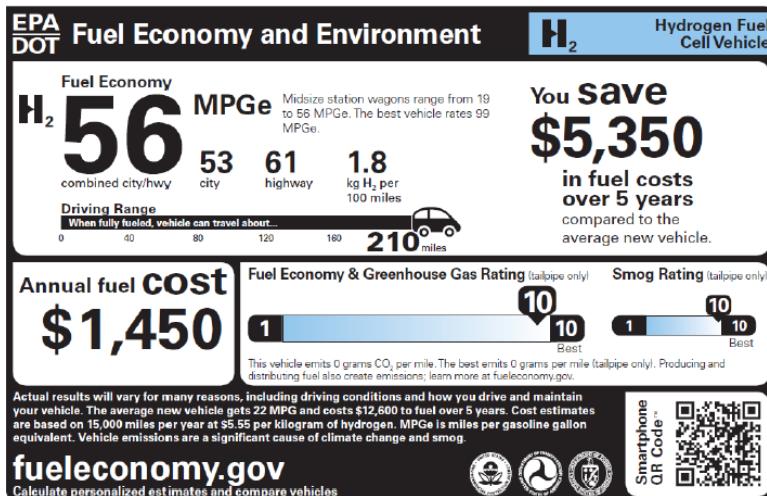


Fig. 10. Etiqueta de eficiencia de combustible y medioambiente para un vehículo de pila de combustible de hidrógeno. Fuente: EPA, 2013.

Hay que tener en cuenta que esta etiqueta es un ejemplo y no representa un coche real. Se utiliza para ilustrar los elementos de la etiqueta asociados a esta tecnología de vehículos, para cada tecnología hay una etiqueta.

En dicha etiqueta aparece lo siguiente:

- Eficiencia del combustible (estimados en millas por galón equivalente), el estimado combinado ciudad/carretera es el utilizado para comparar rápidamente y fácilmente con otros vehículos.
- Eficiencia de combustible comparable. Información para comparar la eficiencia de combustible de un vehículo con otros vehículos en su misma categoría e identificar el vehículo con la más alta eficiencia de combustible entre todos los vehículos.
- Tasa de consumo de combustible. El estimado de la tasa de consumo de combustible, en galones por cada 100 millas (161 km), en conducción combinada en ciudad y carretera.
- Puntuación de eficiencia de combustible y gas de efecto invernadero. Puntuación en una escala de 1 a 10, siendo 10 el máximo, que compara la eficiencia del combustible y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del tubo de escape del vehículo con las de otros vehículos nuevos.
- Información sobre emisiones de CO<sub>2</sub>. Emisiones de CO<sub>2</sub> del tubo de escape en gramos por milla en manejo combinado en ciudad y carretera, y las emisiones de vehículos con las más bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Puntuación de smog. Puntuación en una escala de 1 a 10 basada en emisiones de gases del tubo de escape que contribuyen a la contaminación del aire.
- Costes de combustible. Un estimado de cuánto más o menos el vehículo gastará en combustible en un período de cinco años en relación a un vehículo nuevo promedio así como el coste estimado anual del combustible del vehículo.
- URL del sitio de web: [www.fueleconomy.gov](http://www.fueleconomy.gov)
- Herramienta interactiva de teléfono inteligente.

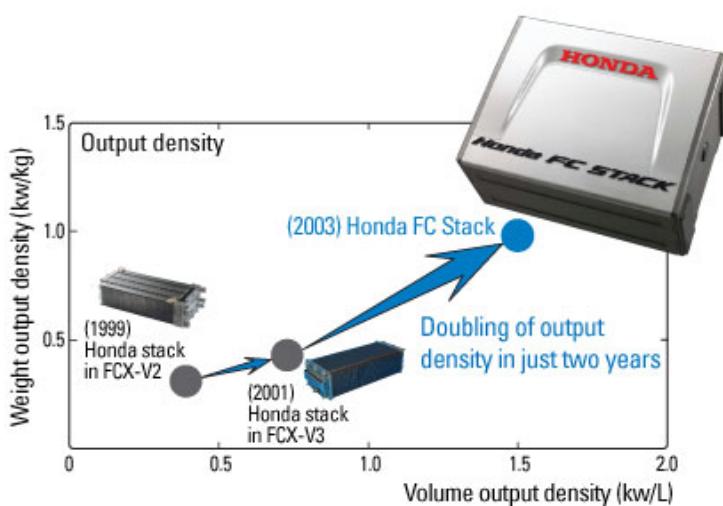
- Gama de rendimiento. Identifica cuántas millas puede recorrer el vehículo de pila de combustible de hidrógeno antes de ser reabastecido de combustible.
- Medida de consumo de energía. Consumo de combustible expresado como unidad de combustible comprado por cada 100 millas (161 km).

Estas etiquetas muestran el coste de combustible para un período de cinco años para el vehículo analizado en comparación con vehículo nuevo promedio. Si el vehículo ahorra dinero al consumidor con respecto al vehículo promedio la etiqueta diría: "Usted ahorrará xxx\$ en costes de combustible durante un período de 5 años en comparación con el vehículo nuevo promedio". Si la operación fuera más cara la etiqueta también lo indicaría. Las estimaciones se basan en 15.000 millas por año, durante cinco años, y el precio de combustible es el proyectado para ese año por la Administración de Información de Energía de los EE.UU. Los precios del combustible se revisan anualmente.

Honda también está trabajando para que en un futuro se pueda recargar combustible directamente en el garaje privado de cada uno de los usuarios, a través de una Home Energy Station.

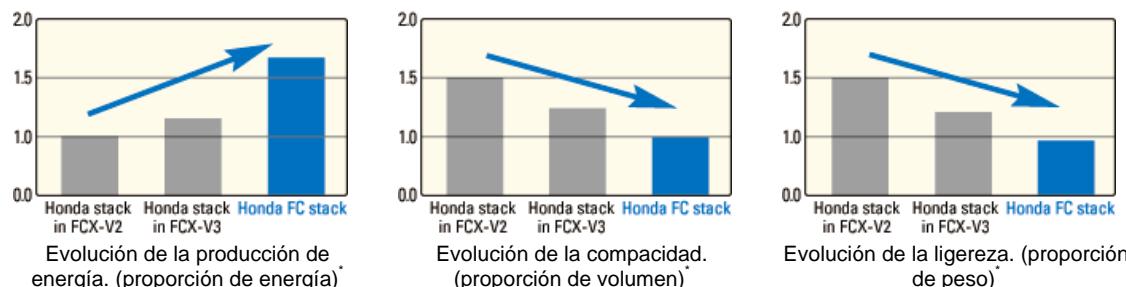
Si se lleva a cabo una comparación del rendimiento de la energía, el FCX Clarity FCEV de Honda es mucho más eficiente que los vehículos a gasolina convencionales para convertir la energía química en potencia. En los vehículos impulsados por gasolina, el combustible (la gasolina) se utiliza para calentar el aire y hacer que se expanda, para que luego propulse los pistones del motor y el cigüeñal. Los vehículos de célula de combustible, por otro lado, son mucho más eficientes, porque la conversión de combustible (hidrógeno) en electricidad, utilizada para impulsar el motor de propulsión eléctrica, es un proceso electroquímico más directo. El agua es el producto derivado. Y dado que el FCX Clarity FCEV tiene muchos menos componentes en el sistema de tracción y no tiene pistones ni árboles de levas, se elimina la pérdida de energía de estos sistemas.

A continuación se muestra la evolución de la pila de combustible de Honda (*Fig.11*):



*Fig.11. Evolución de la pila de combustible de Honda. Fuente: Honda, 2013 (2).*

Mejorando la eficiencia de generación de electricidad y reduciendo el tamaño de la pila de combustible, la nueva pila tiene el doble de densidad (kW/kg) y la mitad de tamaño que su predecesora. Además esta pila de combustible permite operar a temperaturas comprendidas entre -20°C y 95°C, y mejora la durabilidad (*Fig. 12*).



*Fig. 12. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible de Honda.*  
Fuente: Honda, 2013 (2).

\* Dicha proporción se ha calculado considerando los datos de la pila de combustible Honda FCX V2 la unidad.

Por otro lado, el desarrollo de una membrana electrolítica aromática mejora la conductividad de los iones hidrógeno incluso a bajas temperaturas. Como consecuencia la resistencia de la membrana se puede reducir a la mitad, obteniendo conductividad a temperaturas bajo cero, alcanzando una posible operación a temperaturas de -20°C (*Fig. 13*).

Las pilas de combustible convencionales utilizan membranas electrolíticas de flúor, mientras que esta nueva pila de Honda utiliza una membrana aromática de nuevo desarrollo, la combinación de las cadenas principales que contienen una estructura aromática altamente estable tienen un importante intercambio iónico ( $\text{SO}_3^-$ ). Este hecho incrementa su conducción iónica.

La membrana está constituida a partir de un copolímero de bloques aromáticos, alternando segmentos rígidos de ácido sulfónico y partes polímericas flexibles hidrofóbicas. Esta estructura le permite tener una buena resistencia al agua a la vez que mantiene una elevada conductividad.

La membrana ofrece la misma estabilidad química que un polí(ácido perfluorosulfónico) convencional, pero con esta estructura la pila de combustible genera mayor potencia de salida y tiene mayor durabilidad y rango de temperatura.

El tipo de membrana y los factores que influyen sobre su funcionamiento tienen una gran influencia en el rendimiento de las PEMFC. En el estudio llevado a cabo por **Smitha et al. (2005)** se realizó una revisión de los ionómeros perfluorados, de los hidrocarburos, de los polímeros aromáticos y de los complejos ácido-base que se utilizan en las PEMFC.

En dicho estudio se afirma que con el objeto de mejorar la estabilidad de las PEMFC a elevadas temperaturas, se pueden incorporar hidrocarburos aromáticos directamente en la cadena principal del polímero de hidrocarburos o se pueden incorporar polímeros

modificados con grupos voluminosos para hacerlos capaces de conducir protones. Los poliarileno son polímeros rígidos de temperaturas elevadas con  $T_g > 200^\circ\text{C}$  debido a la presencia de grupos aromáticos voluminosos y rígidos. Algunos de los ejemplos de los poliarileno son: las polietersulfonas (PESF), las cetonas de poliéter (PEK), los poli(arileno-éteres), los poliésteres y las poliimidas (PI). Dicho estudio concluye que dentro de los hidrocarburos aromáticos los mejores son los s-PPB, es decir los polisulfonados (4-fenoxi, bencil-1, 4-fenileno) ya que se obtienen estabilidad térmica hasta casi los  $200^\circ\text{C}$ .

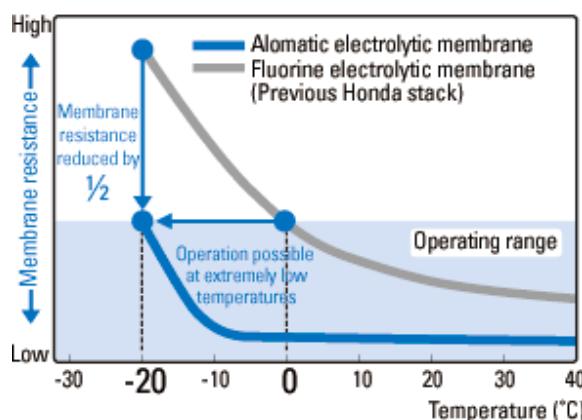


Fig.13. Análisis de la operación de la pila de combustible en función de la Temperatura.  
Fuente: Honda, 2013 (2).

Con la nueva pila de combustible también se consigue mejorar la durabilidad a elevadas temperaturas, ya que con las pilas convencionales no podían operar a elevadas temperaturas ya que los materiales de la membrana no lo soportaban. (Fig. 14).

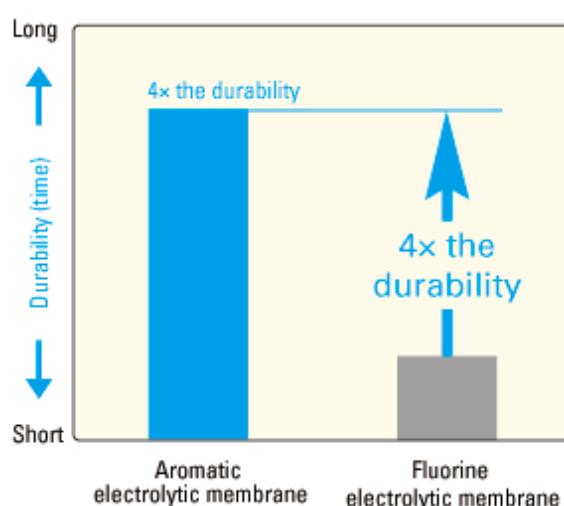


Fig.14. Mejora de la durabilidad a elevadas temperaturas ( $80^\circ\text{C}$ ). Fuente: Honda, 2013 (2).

En cuanto a los depósitos utilizados, se trata de depósitos de hidrógeno a elevada presión construidos con tres capas: un revestimiento de aluminio, una capa de fibra de carbono y una capa de fibra de vidrio. Dispone de dos depósitos con una capacidad de 156,6 litros. Esta gran capacidad combinada con un mejoría del consumo de combustible permite una autonomía de 430 km\*. El tiempo de llenado es de sólo tres minutos, tiempo comparable al necesario para llenar el depósito de un vehículo de motor de gasolina.

\*(LA-4 mode) Ensayos llevados a cabo en Honda. (Fuente: **Honda, 2013 (3)**). Ya que según como se realicen los ensayos la autonomía cambiara. Los ciclos de conducción utilizados para certificar la eficiencia del combustible actualmente en EE.UU. fue desarrollado para representar una conducción típica en un lugar y con un modo de conducción específicos. En 1969, se trabajó en un ciclo de conducción más realista, con el objeto de representar la conducción en Los Angeles por la mañana (trayecto de casa al trabajo). La ruta consistía en 12 millas (19,312 km), llamada ruta LA 4, comenzando y terminando en el laboratorio de emisiones de California. En 1969, 6 trabajadores diferentes de EPA recorrieron el trayecto. A partir de estos datos, se seleccionó una gráfica de velocidad y se acortó para representar la longitud promedio de recorrido en Los Angeles en ese momento. Entonces, todas las aceleraciones y deceleraciones se redujeron a 1,5 m/s<sup>2</sup>. El plan de conducción (UDDS, Urban Dynamometer Driving Schedule) se muestra en la figura 15. Cubre 7,5 millas con una velocidad media de 31,5 km/h. Los 505 segundos iniciales del ciclo se repiten y se añaden al final del UDSS seguidos de 10 minutos de parada para llevar a cabo un procedimiento de prueba.

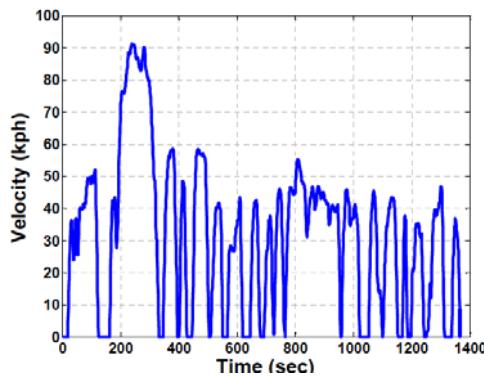


Fig. 15. Ciclo de conducción UDDS. Fuente: **Michelle Irene, 2007**.

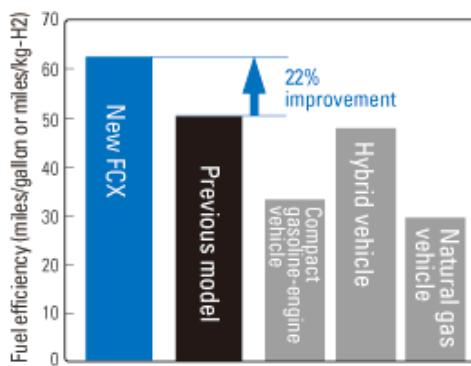


Fig. 16. Comparación de la eficiencia del combustible. Fuente: **Honda, 2013 (4)**.

Se puede observar que la eficiencia energética aumenta un 22% respecto al modelo anterior. Por otro lado el FCX consigue doblar la eficiencia de un vehículo de gasolina (Fig. 16). Incrementándose por lo tanto la autonomía, pasando de 355 a 430 km\*. En la siguiente figura se muestra la distribución de los distintos componentes de este vehículo (Fig. 17).

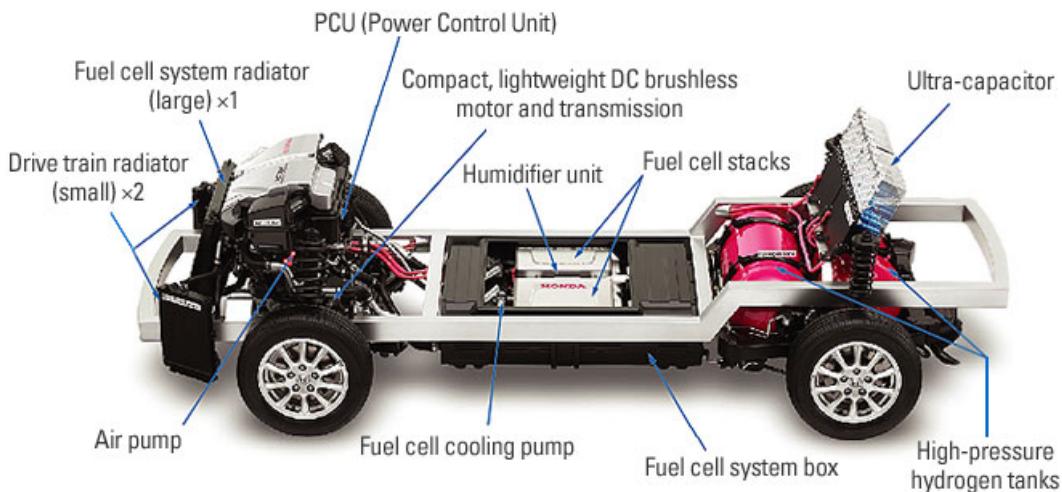


Fig. 17. Distribución de los distintos componentes del vehículo de pila de combustible Honda FCX.

<sup>\*</sup>(LA-4 mode) Ensayos llevados a cabo en Honda.

A continuación se lleva a cabo una comparación entre el FCX (2005) y el FCX Clarity. El sistema de propulsión está compuesto por un sistema de accionamiento eléctrico, una pila de combustible, una batería ión Litio y un sistema de suministro de hidrógeno a alta presión. Se reduce el tamaño y peso del sistema de propulsión con respecto al modelo FCX (2005) (Fig. 18).

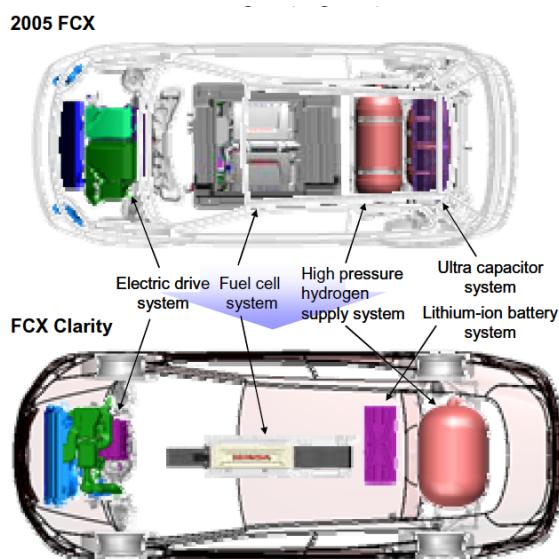


Fig. 18. Comparación del sistema de propulsión. Fuente: Matsunaga M. et al. (2009).

Por otro lado, el tamaño y altura de la pila de combustible se ha reducido con respecto al modelo de pila anterior, alcanzando una potencia máxima de 100 kW. La densidad volúmetrica de la nueva pila de combustible es un 50% mayor y la densidad de peso un 67% mayor con respecto a la pila anterior, por lo que es más ligera y más compacta (**Matsunaga M. et al. (2009)**) (Fig. 19).

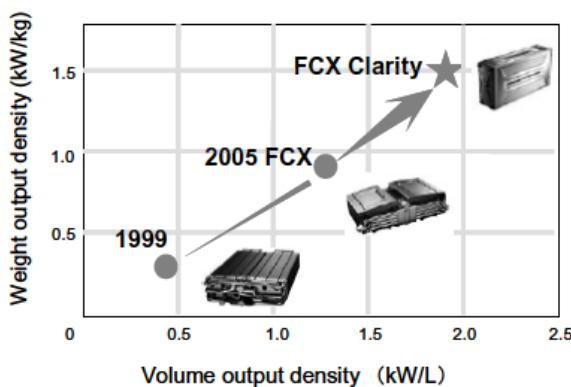


Fig.19. Evolución de las pilas de combustible de Honda. Fuente: Matsunaga M. et al. (2009).

En cuanto al sistema de almacenamiento del H<sub>2</sub> se ha pasado de dos depósitos a un único depósito (Fig.20).

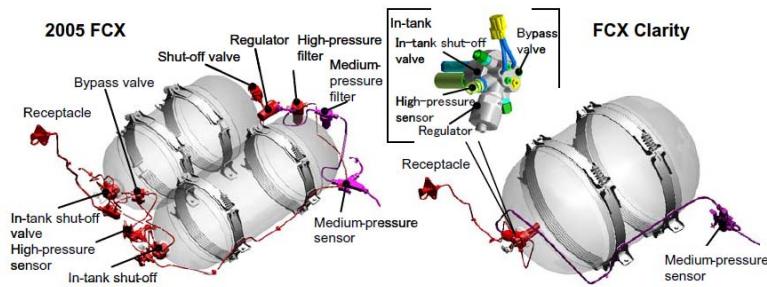


Figure16: Hydrogen supply system

Fig.20. Sistemas de almacenamiento. Fuente: Matsunaga M. et al. (2009).

El Honda FCX Clarity alcanza un rendimiento del 60% (LA-4 MODE), teniendo un rendimiento tres veces mayor que un vehículo con motor de gasolina y más de dos veces mayor que un vehículo híbrido (Fig.21).

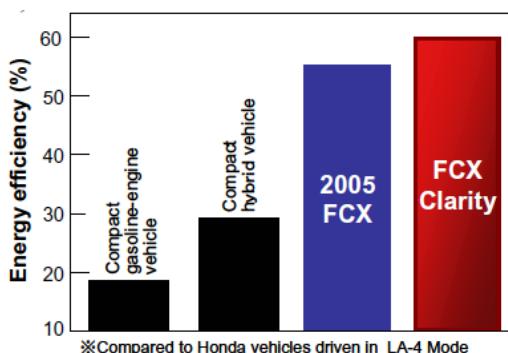
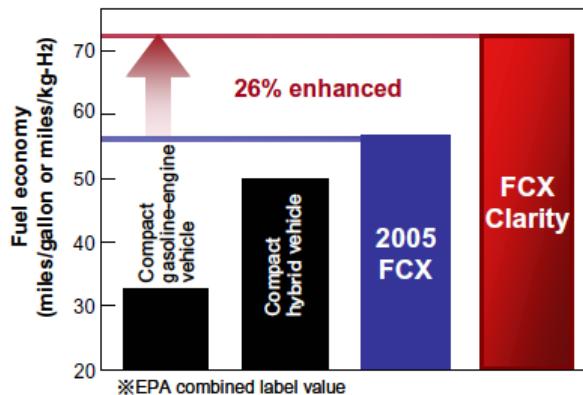


Fig.21. Rendimiento energético del vehículo. Fuente: Matsunaga M. et al. (2009).

El Clarity puede recorrer 115,2 km/kg de H<sub>2</sub> (72 millas/kg de H<sub>2</sub>), lo que corresponde a una distancia 2,1 veces mayor que la que puede recorrer un vehículo de gasolina y a

una distancia 1,4 veces mayor de la que puede recorrer un vehículo híbrido con el mismo consumo de energía (*Fig.22*).



*Fig.22.* Economía del combustible del vehículo. Fuente: **Matsunaga M. et al. (2009)**.

El Honda Clarity ha alcanzado 570 km de autonomía, incrementándola un 30% con respecto a su modelo previo (FCX 2005) (430 km). Y el rango de temperaturas a las que puede arrancar es más amplio que en el caso del modelo previo, pudiendo arrancar a -30°C.

De la marca **Hyundai** se han recogido 12 vehículos de pila de combustible entre el año 1992 y el año 2012. De estos 12 vehículos para el análisis se descartan tres, el FCV(metanol)(2000) porque no se tiene bastante información para poder analizarlo y el Kia SIDEWINDER (2006) y el GATOR (2006) por tratarse de vehículos que están en la fase de estudio de diseño.

Hyundai comenzó a demostrar su capacidad para trabajar con pilas de combustible con el Hyundai Santa Fe, el modelo del año 2000 tenía una pila de combustible de 75 kW, con una autonomía de 160 km y una velocidad máxima de 124 km/h. El siguiente modelo (año 2001) aumentó su autonomía incrementándola a 402 km (incremento del 151 %).

Tras varios años investigando aparece la segunda generación de FCEV con la plataforma de TUCSON, consiguiéndose un aumento de la potencia a 80 kW y utilizando batería, es el TUCSON del año 2004.

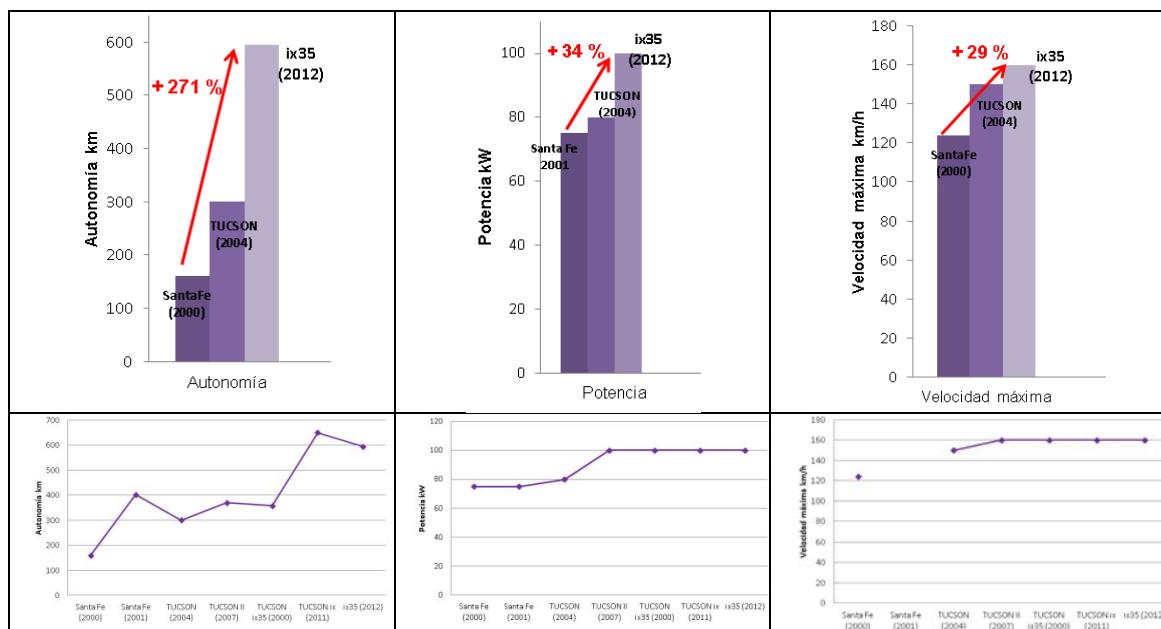
Más tarde aparece la tercera generación de FCEV con el Hyundai ix 35, aumentando la autonomía (más del 50%) y la eficiencia (aprox 15%). El Hyundai ix 35 también es llamado Tucson ix en Corea.

La producción en serie del Hyundai ix35 Fuel Cell comenzó en la planta de fabricación de Ulsan, Corea, en diciembre del año 2012, convirtiendo así a Hyundai en el primer fabricante de automóviles en iniciar la producción comercial de un vehículo impulsado por hidrógeno (Fuente: Hyundai).

El ix35 Fuel Cell está equipado con un motor eléctrico de 100 kW (136 CV) con el que alcanza una velocidad máxima de 160 km/h. Dos depósitos de almacenamiento de hidrógeno, con una capacidad total de 5,64 kg, hacen posible que el vehículo pueda recorrer un total de 594 km con una sola carga y arrancar de forma fiable a temperaturas tan bajas como 25 grados bajo cero. La energía se almacena en una batería de 24 kW (28,5 CV) de polímero de iones de litio, desarrollada conjuntamente con LG. El tiempo que cuesta repostar y llenar por completo el depósito es 5 minutos, comparado con los dos o tres minutos que cuesta repostar un vehículo de gasolina o gasoil. El consumo de este vehículo es de 0,95 kg H<sub>2</sub> /100 km. (Datos facilitados por el constructor)

La autonomía (594 km) es ligeramente superior a la cantidad de H<sub>2</sub> disponible (589 km) porque el sistema de control mantiene siempre una cantidad de combustible a modo de reserva, para que los depósitos no se vacíen por completo y exista una diferencia de presión que dificulte el repostaje.

A continuación se muestra la evolución de los vehículos de pila de combustible de Hyundai (*Fig.23*).



*Fig.23. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.*

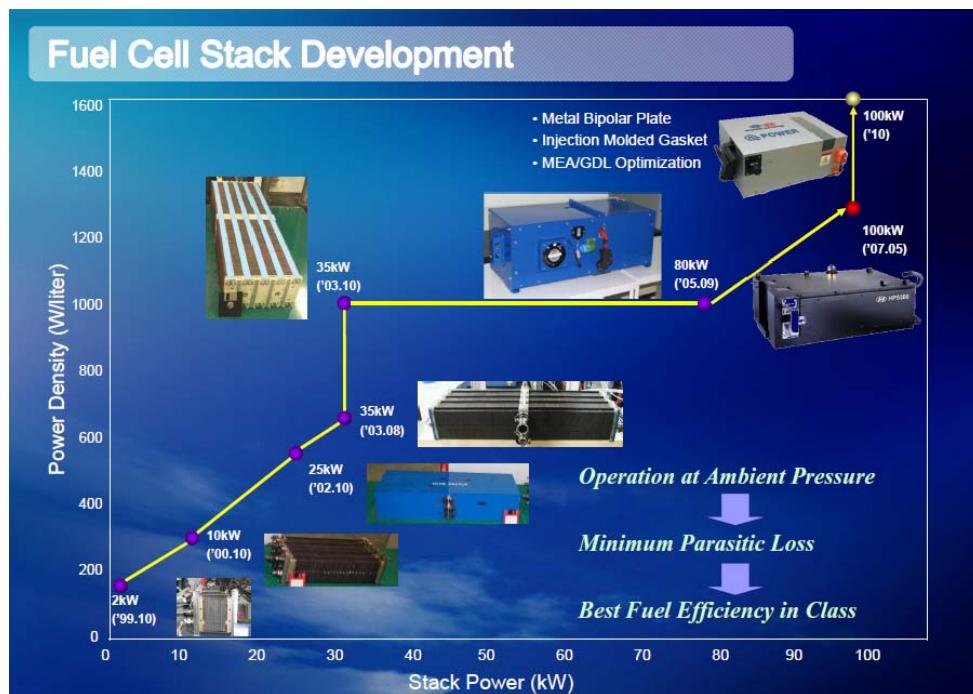


Fig. 24. Evolución de la pila de combustible de Hyundai. Fuente: **Hyundai, 2013 (1)**.

En la Fig. 24 se puede observar el desarrollo de las pilas de combustible utilizadas por Hyundai, a medida que ha ido aumentando la potencia desarrollada por la pila, ha ido aumentando la densidad de potencia (W/litro), es decir potencia por unidad de stack de celdas de combustible llegando a 1,65 kW/litro para el caso de la pila de combustible de 100 kW.

En cuanto a la durabilidad de este sistema de pila de combustible, calculada en función de los parámetros de operación, del modo de conducción y de los efectos sobre el medio ambiente se obtiene que la durabilidad ha aumentado alcanzando las 8.000 horas, mientras que el objetivo establecido es que tengan 5.000 horas de durabilidad (Fig.25).

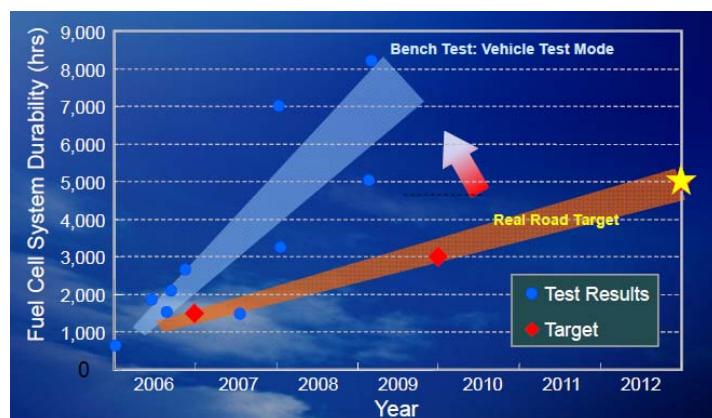


Fig. 25. Durabilidad de la pila de combustible de Hyundai. Fuente: **Hyundai, 2013 (1)**.

Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos ix35 Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.

Hyundai ya ha firmado contratos de leasing de vehículos ix35 Fuel Cell para las flotas municipales de Copenhague, Dinamarca, y Malmö, Suecia. Además, desde octubre de 2011, el Proyecto Conjunto de Pilas de Hidrógeno y de Combustible (FCH JU) de la UE en Bruselas facilita vehículos Hyundai ix35 Fuel Cell a los diseñadores de políticas de la UE y al público con el fin de demostrar la viabilidad en el mercado de la tecnología de pila de combustible.

En España, por ejemplo, está disponible el Hyundai ix35 bajo pedido costando 125.000 € aproximadamente (Fuente: **Hyundai**). Y aunque este precio es muy elevado refleja una reducción de costes ya que el anterior prototipo, el TUCSON FCEV de 2004, tenía un coste de 800.000 €, y el primer prototipo, el Santa Fe FCEV superaba el millón de €.

Después de 2015, con la reducción de los costes de producción de vehículos y la infraestructura más desarrollada de hidrógeno, Hyundai comenzará a fabricar vehículos de pila de combustible de hidrógeno para la venta a clientes, esperando que cada vehículo cueste menos de 100.000 €.

El Hyundai i-Blue (2007) y Blue2 (2011) no se analizan en profundidad porque al tratarse de prototipos no se dispone de toda la información para realizar el análisis comparativo.

De la marca **Toyota** se han recogido 19 vehículos de pila de combustible entre el año 1992 y el año 2012. De estos 19 vehículos se descarta uno por tratarse de una maqueta (FCH-MH Concept).

Toyota comenzó a trabajar con los FCHV en 1992 con el desarrollo de sus propias celdas de combustible de hidrógeno y los depósitos de almacenamiento de hidrógeno en sus instalaciones. La empresa aplica su tecnología de conducción híbrida al desarrollo de los FCHV sustituyendo los motores de gasolina por celdas de combustible y sus pilas FC presentan el mejor rendimiento del sector.

Toyota en primer lugar introdujo la línea de vehículos híbridos de pila de combustible basadas en el Highlander y los llamó FCHV (Fuel Cell Hybrid Vehicle). El FCHV-2 se introdujo en 1998, el FCHV-3, FCHV-4 y FCHV-5 se introdujeron en 2001, con una actualización en 2002. El Toyota FCHV obtuvo la certificación en 2005.

El FCHV-2 utiliza como combustible metanol reformado, el FCHV-3 hidrógeno comprimido almacenado en hidruro metálico, el FCHV-4 hidrógeno comprimido y el FCHV-5 utiliza como combustible hidrógeno y gasolina de bajo contenido en azufre ya que dispone de una opción de limpieza de hidrocarburos.

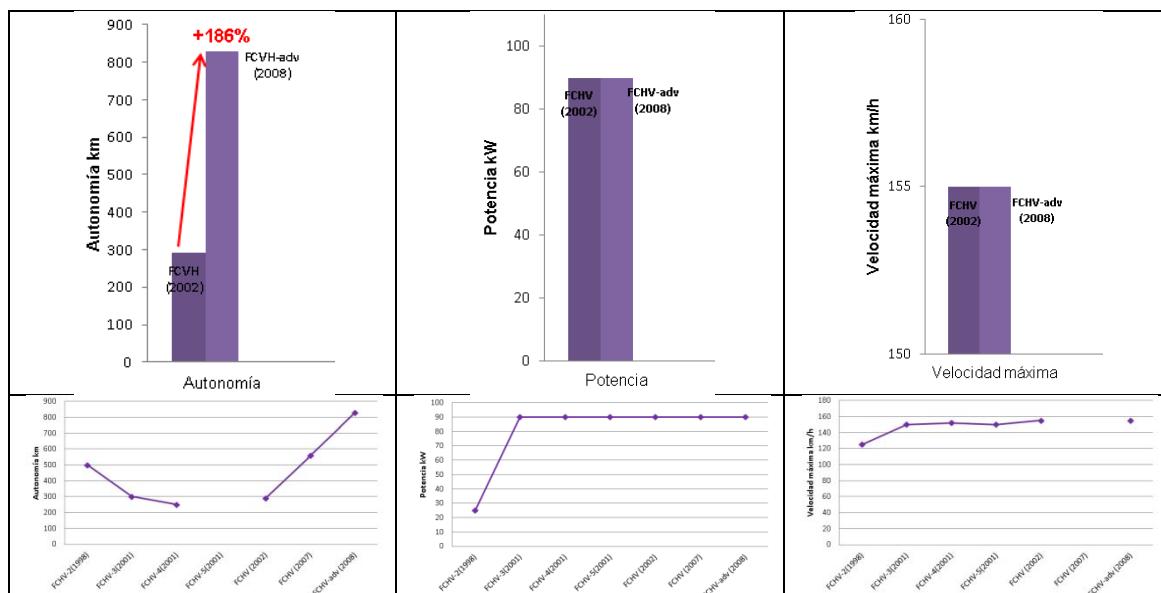
En su última configuración (año 2007), el FCHV tiene las siguientes características: cuatro tanques de almacenamiento que mantienen el hidrógeno comprimido a 10000 psi (70 MPa). Después de que el gas comprimido sale de los tanques, fluye a través de reguladores que reducen la presión para que la pila de células de combustible PEM pueda procesarlo. Un nuevo tanque de almacenamiento de hidrógeno permite al FCHV recorrer 560 km.

Se cuenta además con un, motor eléctrico de 90 kW permanente. El Toyota FCHV está equipado con una batería de hidruro de níquel de 21 kW, similar a la que se utiliza en otros automóviles híbridos. Cuando se desacelera, el motor eléctrico actúa como generador y ayuda a recargar la batería, algo común en este tipo de vehículos.

La siguiente generación de vehículo híbrido con celdas de combustible, el FCHV-adv, que contaba con una pila FC de Toyota totalmente renovada y de alto rendimiento, obtuvo la certificación del Ministerio japonés de Territorio, Infraestructuras y Transporte el 3 de junio de 2008.

La eficiencia en el consumo de combustible del Toyota FCHV-adv se ha incrementado en un 25 % gracias al uso de los depósitos de almacenamiento de hidrógeno a alta presión de 70 Mpa desarrollados por Toyota (**Toyota, 2013 (1)**). Además, este modelo cuenta con una autonomía a velocidad constante de aproximadamente 830 km tras una única recarga, es decir, más del doble que su predecesor, el Toyota FCHV. Otra de las ventajas del TOYOTA FCHV-adv es que funciona incluso a -30 °C, lo que mejora enormemente su rendimiento en climas fríos (**Toyota, 2013 (1)**).

A continuación se puede observar la evolución de esta línea de vehículos (*Fig.26*).



*Fig.26. Análisis de la evolución de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.*

De las gráficas anteriores se puede concluir que lo que más se incrementa en los 6 últimos años analizados (2002-2008) es la autonomía, ya que la potencia y la velocidad máxima en este período permanecen constantes.

En las gráficas de puntos se observa que la tendencia no se estabiliza hasta los últimos 6 años, ya que los modelos anteriores al año 2002 son prototipos con los que se está estudiando como diseñar el modelo de vehículo de hidrógeno apropiado.

Toyota tiene dos versiones de vehículo de pila de combustible de su RAV4, son el RAV4 FCE SUV (1996) y el RAV4 FCE (1997), el primero utiliza como combustible hidrógeno almacenado en hidruro metálico y el segundo utiliza metanol. Si se analiza los datos de estos vehículos en la tabla se puede observar que la potencia aumenta un 25% (pasa de 20 kW a 25 kW), la autonomía también se ve incrementada duplicándose (pasa de 250 km a 500 km) y por último, la velocidad máxima también se ve incrementada un 25% (pasa de 100 km/h a 125 km/h).

Por otro lado está el modelo OVONIC H2 Prius y el modelo QUANTUM H2 Prius, las empresas Ovonic Hydrogen Systems y Quantum modificaron un Toyota Prius modelo 2002 para que funcione con un motor de combustión interna con H<sub>2</sub> y con una batería. Hay un modelo del 2003, otro del 2004 y otro del 2005, en los que se puede observar la evolución. En la tabla se puede observar que la autonomía ha ido incrementándose pasando de 200 km, a 320 km y a 380 km. El modo de almacenaje del H<sub>2</sub> ha ido cambiando, el primer modelo 3kg de H<sub>2</sub> almacenado como hidruro metálico, el segundo modelo tiene un sistema de almacenamiento de 2 tanques de hidruros metálicos de 33 litros y el último modelo tiene un sistema de almacenamiento Quantum de H<sub>2</sub> comprimido a 35 MPa de 1,6 kg de H<sub>2</sub> y un sistema de almacenamiento de hidruros metálicos a 10 MPa y 4,0kg con un rango de 68 km/kg de H<sub>2</sub> (**Quantum, 2013**).

Se desarrolló la línea de vehículos FINE: FINE-S es un vehículo concepto presentado en 2003 que utiliza un sistema híbrido de pila de combustible, FINE-N es una actualización del anterior, y por último el FINE X, que en Europa y Japón se conoce como FINE T. Los tres modelos hacen funcionar cuatro motores independientes, uno en cada rueda.

Por último está el modelo FCV-R concept que tiene una autonomía de 700 km (medido en el ciclo de prueba JC08), alcanza los 80 km/h y tienen una pila de combustible de 1.5 kW. Funciona con hidrógeno comprimido a 70 MPa. Se trata de un prototipo, pero se espera que salga al mercado en el año 2015. Toyota espera que dicho vehículo salga a la venta con un precio de unos 50.000 \$ (Fuente: **Toyota, 2013 (2)**).

La manera convencional de comparar la eficiencia de distintos vehículos es mediante la distancia que pueden recorrer por unidad de combustible (km/l o mpg). Sin embargo, este método presenta dificultades si los vehículos comparados utilizan distinto tipo de combustible, como puede ser hidrógeno o gas natural. En estos casos se debe utilizar un criterio que no solamente mida cómo eficiente es el vehículo utilizando la energía (“depósito a rueda” (tank to wheel)), sino que también tenga en cuenta la eficacia de cómo se obtiene la energía y es transportada al depósito del

vehículo (“pozo al depósito” (well to tank)). Esta medida de eficiencia se conoce como “pozo a rueda” (well to wheel).



(1) Well to tank: Eficiencia con la que el combustible es obtenido, procesado, almacenado y transportado al depósito del vehículo.

(2) Tank to wheel: Eficiencia con la que el combustible consumido en el depósito del vehículo y convertido en movimiento del vehículo, a través del movimiento de las ruedas.

Tabla 2. Comparación de la eficiencia de distintos tipos de vehículos. Fuente: Toyota, 2013 (3).

	Eficiencia del combustible “well-to-tank” (%)	Eficiencia del vehículo “tank-to-wheel” (%)	Eficiencia global (well-to-wheel) (%)				
			0	10	20	30	40
Vehículo de gasolina		16			14%		
Prius (Vehículo híbrido de gasolina)	88	37					32%
FCV (hidrógeno comprimido)		38				22%	
TOYOTA FCHV	58 <sup>3</sup>	50					29%
FCHV (objetivo)	70	60					42%

<sup>3</sup> Eficiencia si el hidrógeno es producido a partir de gas natural.

■ En el ciclo de ensayo japonés 10-15. Ensayo en las instalaciones de Toyota.

Fuente: Toyota FCHV Book. Fuel Cell Hybrid Vehicle.

Un vehículo convencional de gasolina tiene una eficiencia “tank to wheel” de 16% y una eficiencia global de un 14%. Si se compara con un vehículo híbrido de gasolina (Toyota Prius), éste tiene un 37% de eficiencia “tank to Wheel”, más del doble que la eficiencia del vehículo de gasolina convencional, y un 32% de eficiencia global, que también es más del doble que para el caso del vehículo de gasolina convencional (Tabla 2).

El Toyota FCHV tiene una eficiencia elevada de “tank to Wheel” de un 50%, más del triple que un vehículo de gasolina, aunque la eficiencia global es del 29%, esto se debe a que la eficiencia de obtener el H<sub>2</sub> a partir del gas natural es todavía baja, un 58%. Toyota estima que los vehículos de pila de combustible deben tener una eficiencia global que triplique a la eficiencia de los vehículos de gasolina si quieren ser la nueva tecnología que se aplique a los vehículos (Tabla 2).

En septiembre de 2009, diferentes compañías (Honda, Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation/Opel, Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, la alianza Renault SA y Nissan Motor Corporation y Toyota Motor

Corporation), firmaron un acuerdo para homogeneizar el desarrollo y la introducción al mercado de vehículos eléctricos impulsados con pila de combustible, lo que se consideró un gran paso hacia la producción en serie de vehículos de emisión cero. En el acuerdo, las compañías anticipaban que a partir del año 2015 una cantidad significativa de vehículos eléctricos con pila de combustible podrían ser comercializados.

Es necesario destacar, que lo que más ha dificultado el análisis y comparación de los datos contenidos en la tabla de vehículos es el hecho de que hay datos de fabricantes referentes a la economía del combustible y a la autonomía en los que no se detalla en qué condiciones se han obtenido, es decir, qué tipo de conducción se ha llevado a cabo para obtener estos resultados. Ya que en función el tipo de conducción y las condiciones en las que se ha llevado a cabo, la economía del combustible y la autonomía del vehículo varían.

Se tiene que tener en cuenta que los cálculos de economía de combustible y promedio de recorrido (autonomía) basados en los datos de las distintas pruebas, variarán en función de la prueba llevada a cabo y en concreto, la distancia de recorrido real variará en función de los hábitos de conducción y del mantenimiento del vehículo.

## **TABLA ESTADO ACTUAL TECNOLOGÍA**

En la siguiente tabla se presenta un resumen del estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible, mostrando el estado en el que se encuentran 6 vehículos de los fabricantes que más vehículos de pila de combustible han desarrollado.

En dicha tabla se hace mención a NEDC en el campo en el que se analiza la economía del combustible y en el campo en el que aparece la autonomía del vehículo, por este motivo, a continuación se explica a qué se refieren las siglas NEDC.

El nuevo ciclo estándar europeo de conducción (NEDC, New European Driving Cycle) es una prueba consistente en un ciclo de conducción para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles. Durante este ciclo se miden las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas (PM). El consumo de combustible se determina por los componentes y cantidades de las emisiones (**ADAC, 2013**).

El NEDC consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extra-urbano (Extra-Urban driving cycle EUDC). La prueba se basa en la legislación europea sobre emisiones. La distancia es de 11.007 metros, la duración es de casi 20 minutos, alcanzando una velocidad máxima de 120 km/h y siendo la velocidad media de 33,6 km/h.

De acuerdo a la directiva 98/69/EC la prueba consiste en una primera parte de conducción urbana, arrancando el vehículo por la mañana tras haber estado toda la noche parado, y se conduce en hora punta con múltiples paradas debidas a atasco. La segunda parte consiste en una conducción de carretera con una velocidad máxima de 120 km/h. Todas las pruebas cumplen la directiva 70/220/EC.

La prueba en frío (NEDC Cold Test) evalúa los contaminantes, el CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible, mientras que la prueba en caliente (NEDC Hot Test) evalúa el CO<sub>2</sub> y el consumo del combustible.

Tabla 3. Estado actual de la tecnología del vehículo de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.

Fabricante	Vehículo	Imagen	General Motors	HydroGen3 liquid	Honda	Hyundai	Toyota
Año			2004	2007	FCX Clarity	i35	FCHV-adv
P(kW)			94 kW	93 kW	100 kW	100 kW	2008
Consumo (kg H <sub>2</sub> /100 km)	Mercedes clase B Fuel Cell		No consta	1,59 kg H <sub>2</sub> /100 km (39 mpg o 17 km/l <sup>(8)</sup> )	~1 kg H <sub>2</sub> /100 km	0,95 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(4)</sup>	0,71 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(15)</sup> (japonés 10-15 test cycle)
Consumo (MJ/100 km)	Daimler AG		2009	94 kW	190,8 MJ/100 km	124,30 MJ/100 km <sup>(12)</sup> (EPA)	85,2 MJ/100 km (japonés 0-15 test cycle)
Autonomía	Autonomía		116,4 MJ/100 km	No consta	320 km	570 km	594 km
Velocidad máxima			~400 km <sup>(2)</sup>	400 km	160 km/h	160 km/h	160 km/h
Fabricante Pilas	Ballard		170 km/h <sup>(4)</sup>	GM	GM (cuarta generación)	HMC (Honda FC Stack)	HMC (Honda FC Stack)
Volumen Pilas			Batería de litio (iones de litio)	0,94 kW/kg (potencia específica) <sup>(7)</sup> 1,60 kW/l (densidad de potencia) <sup>(7)</sup>	No consta	1,5 kW/kg (potencia específica) <sup>(11)</sup> 1,90 kW/l (densidad de potencia) <sup>(11)</sup> Volumen: 57 l <sup>(2)</sup> Peso: 67,13 kg <sup>(12)</sup>	1,65 kW/l (densidad de potencia) <sup>(13)</sup> 45,359 kg (100 libras) <sup>(16)</sup>
Batería SiN	Precio		SI	SI	SI	SI	SI
			Plan de alquiler: 2 años: \$49 \$/mes pagando 2.000 \$ en la firma <sup>(3)</sup>	No consta	No consta	Plan de alquiler: 3 años a 600 \$/mes (comercializado mediante leasing 2.160 \$) <sup>(10)</sup>	Plan de alquiler: 30 meses a 1.050.000 yenes <sup>(17)</sup>
Depósito (capacidad)			3,7 kg <sup>(14)</sup>	1 cilindro pequeño volumen interior de 19,4 litros y exterior de 31 litros. 2 cilindros más grandes: 37,5 litros de volumen interior cada uno. (Una cuarta de espacio mucho mayor que la de un depósito tradicional de combustible de capacidad similar (unos 35 litros))	4,6 kg (68 litros)	4,2 kg	171 litros depósito, 3,92 kg <sup>(12)</sup>
Aspectos especiales			Primer vehículo comercializado en serie utilizando hidrógeno como combustible que tuvo lugar en el verano del año 2004. Recorrió 9.696 kilómetros a través de 14 países europeos sin problemas. En abril de 2005 ganó el rally de Monte Carlo para vehículos de pila de combustible <sup>(6)</sup>	En el invierno de 2008 para uso del consumidor. Es fabricante tiene la mayor flota de vehículos de hidrógeno del mundo, 119 vehículos.	Proyecto Drive by: Es fabricante tiene la mayor flota de vehículos de hidrógeno del mundo, 119 vehículos.	Ganador del premio FutureAuto 2013. Atracada a -25°C. Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos el año 2015. Se está trabajando en el desarrollo de hidrógeno para vehículos de hidrógeno para el año 2015. Destinadas principalmente al sector público o a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.	Disponible desde el verano de 2008 para uso del consumidor. Requefios es: catálogo de producción de 200 vehículos entre 2008-2010. leasing en el sur de California y en Japón <sup>(7)</sup> . Se pone su venta en Europa en 2015 <sup>(8)</sup> .
Combustible	Hidrógeno comprimido 70 MPa		1809 kg <sup>(1)</sup>	Hidrógeno líquido	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Hidrógeno comprimido 70 MPa
Peso	Peso Bruto		2084 kg <sup>(1)</sup>	1590 kg <sup>(7)</sup>	1625 kg <sup>(9)</sup>	1830 kg <sup>(14)</sup>	1880 kg <sup>(16)</sup>
						1980 kg <sup>(14)</sup>	

(1) Mercedes-Benz, 2013 (2). <http://blogs.km77.com/teletransporte/5994/mercedes-benz-clase-b-f-cell-tecnica-y-graficos/>(2) Mercedes-Benz, 2013 (3). <https://www.daimler.com/dccom/0-5-122989-1-1401156-1-0-0-1401206-0-0-0-0-0-0-0-0.htm>(3) Mercedes-Benz, 2013 (4). [http://www.mbusa.com/mercedes-benz/green/electric\\_car/](http://www.mbusa.com/mercedes-benz/green/electric_car/)(4) Mercedes-Benz, 2013 (5). <http://www.mbusa.com/bcm/MBDigitalAssessment/mbf-cell.pdf>(5) GM 2013, (1). [http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea\\_2008/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea_2008/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)(6) Noriko Hiroki, 2013. (2). [http://techtion.toyota.com/technology/challenges\\_and\\_future\\_research\\_needs](http://techtion.toyota.com/technology/challenges_and_future_research_needs)(7) GM 2013, (3). [http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea\\_2008/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea_2008/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)(8) GM 2013, (4). [http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea\\_2008/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea_2008/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)(9) Honda 2013, (5). [http://priestroom.toyota.com/article\\_display.cfm?article\\_id=2388](http://priestroom.toyota.com/article_display.cfm?article_id=2388)(10) Honda 2013, (6). <http://www.blogenergiasostenible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/>

(11) Matsunaga M. et al. (2009) (Análisis tabla vehículos)

(12) Honda 2013, (7). <http://autombiles.honda.com/spanish/fcx/fcx-technology/specifications.aspx>(13) Hyundai 2013, (2). [http://www.hyundaienergy.gov/pdf/hmc\\_may2012\\_hydro.pdf](http://www.hyundaienergy.gov/pdf/hmc_may2012_hydro.pdf)(14) Hyundai 2013, (3). [http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea\\_2008/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://janpan-motorshowgneur.eu/partsinfo/info/shows/genvea_2008/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)(15) Toyota 2013, (4). [http://www.toyota.com/eq/pdf/Toyota\\_NHA\\_keynote\\_2010.pdf](http://www.toyota.com/eq/pdf/Toyota_NHA_keynote_2010.pdf)(16) Toyota 2013, (5). [https://techtion.toyota.com/technology/technohub/technicalcontent/fchv\\_adv\\_eng.pdf](https://techtion.toyota.com/technology/technohub/technicalcontent/fchv_adv_eng.pdf)(17) Toyota 2013, (6). [http://priestroom.toyota.com/article\\_display.cfm?article\\_id=2388](http://priestroom.toyota.com/article_display.cfm?article_id=2388) (Toyota FCVH Fact Sheet eel)

## **BIBLIOGRAFÍA**

ADAC / FIA Foundation - EcoTest Testing and Assessment Protocol Release 2.0, 2013.

Daimler AG, 2013. [http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user\\_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende\\_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Joerg\\_Wind\\_Daimler.pdf](http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Joerg_Wind_Daimler.pdf)

EPA, 2013. Fuel Economy Labels in EPA and DOT Final Rulemaking “Revisions and Additions to Motor Vehicle Fuel Economy Label”  
<http://www.epa.gov/otaq/carlable/fealllabels.pdf>

Fuel cell technology Handbook. Edited by Gregor Hoogers. ISBN 0-8493-0877-1, 2003.

GM, 2013 (1). [http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/geneva\\_2006/downloads/gm/en/pdf/gm\\_fuel\\_cell\\_en.pdf](http://planer-motorshow.gmeuropearchive.info/shows/geneva_2006/downloads/gm/en/pdf/gm_fuel_cell_en.pdf)

GM, 2013 (2). Gregory Hoogers. Fuel Cell Technology Handbook.

GM, 2013 (3). 2010 Fuel Cell Technologies market report. Junio 2011. U.S. Department of energy. Energy Efficiency & Renewable Energy

Honda, 2013 (1). <http://automobiles.honda.com>

Honda, 2013 (2). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/fcstack/evolution/>

Honda, 2013 (3). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/specifications/>

Honda, 2013 (4). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/operationalcapabilities/efficiency/>

Honda, 2013 (5). Flamborg S. et al. (2010). Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. DOT HS 811 267.NHTSA.

Honda, 2013 (6). <http://www.blogenergiasostenible.com/el-honda-fcx-clarity-el-primer-coche-de-hidrogeno-de-venta-en-concesionarios/>

Honda, 2013 (7). <http://automobiles.honda.com/spanish/fcx-clarity/specifications.aspx>

Hyundai, 2013 (1). [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)

Hyundai, 2013 (2). [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)

Hyundai, 2013 (3). [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_no-v\\_marcas/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_no-v_marcas/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)

km77, (2013). <http://www.km77.com/marcas/mercedes/necar5/sumario1.asp>

Matsunaga M., Fukushima T., Ojima K. “Powertrain system of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle”. EVS24 Stavanger, Noruega, Mayo 2009. World Electric Vehicle Journal Vol. 3 - ISSN 2032-6653

Mercedes-Benz, 2013 (1). <http://washingtonfuelcellsummit.com/proceedings/mobile1-simon.pdf>

Mercedes-Benz, 2013 (2). <http://blogs.km77.com/teletransporte/5994/mercedes-benz-clase-b-f-cell-tecnica-y-graficos/>

Mercedes-Benz, 2013 (3). <https://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1401156-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0.html>

Mercedes-Benz, 2013 (4). [http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric\\_car](http://www.mbusa.com/mercedes/benz/green/electric_car)

Mercedes-Benz, 2013 (5). <http://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/pdfmb/green-f-cell.pdf>

Michelle Berry Irene. "The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of U.S. Light-Duty vehicles. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

Noriko Hikosaka Behling, Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs.

Quantum,2013. [www.qtww.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php](http://www.qtww.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php)

Smitha B., Sridhar S., Khan A.A., "Solyd polymer electrolyte membranes for fuel cell applications – a review. Journal of membrane science 259 (2005) 10-26.

Toyota, 2013 (1). [http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept\\_cars-fchv/index.tmex](http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept_cars-fchv/index.tmex)

Toyota, 2013 (2). <http://www.bloomberg.com/news/2010-05-06/toyota-targets-50-000-range-for-hydrogen-powered-sedan-planned-by-2015.html>

Toyota, 2013 (3). <http://www.toyotaaruba.com/toyota/readBlob.do?id=134>

Toyota, 2013 (4). [http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota\\_NHA\\_keynote\\_2010.pdf](http://www.toyota.com/esq/pdf/Toyota_NHA_keynote_2010.pdf)

Toyota, 2013 (5). [https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/fchv\\_adv\\_erg.pdf](https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/fchv_adv_erg.pdf)

Toyota, 2013 (6). [http://pressroom.toyota.com/article\\_display.cfm?article\\_id=2388](http://pressroom.toyota.com/article_display.cfm?article_id=2388)

Tran Doanh, Cummins Michael. "Development of the Jeep Commander 2 Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle". SAE technical paper series 2001-01-2508.

US Department of Energy, 2013. [http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_sbs.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml)

Zhao Hengbing, Burke Andrew. "Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors: Device Characteristics Control Strategies, and Simulation Results. Research report UCD-ITS-RR-10-01, 2010. Institute of transportation studies, University of California.

**ANEXO II. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS  
VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.**

**ANEXO II. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.**

<b>2.1. Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Impacto ambiental de los FCVs.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Análisis económico de los FCVs. ....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Estado actual de los vehículos de pila de combustible.....</b>	<b>28</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>34</b>

**ANEXO II. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE.**

En este anexo se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los vehículos de pila de combustible teniendo en cuenta aspectos medioambientales y económicos.

El hidrógeno como combustible en la automoción tiene dos aplicaciones: las pilas de combustible y los motores de combustión interna alternativos. En ambas aplicaciones este combustible se combina con el oxígeno del aire, generando electricidad en el caso de las pilas de combustible y energía mecánica en el caso de los motores térmicos.

En el vehículo, el hidrógeno se puede almacenar en un depósito, o se puede obtener a partir de otro combustible en un reformador instalado a bordo. El oxígeno se obtiene generalmente del aire. Si se utiliza hidrógeno puro esta tecnología emite a la atmósfera únicamente vapor de agua, lo que supone grandes beneficios medioambientales. Sin embargo, para que la pila de combustible se utilice a nivel comercial es necesaria una reducción de sus costes, por ejemplo disminuyéndose la cantidad de metales preciosos (como platino o paladio) utilizados como catalizadores.

La opinión general del sector es que a largo plazo se impondrán las pilas de combustible frente a los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, porque son más eficientes. Su rendimiento es mayor ya que convierte directamente energía química en eléctrica.

Las pilas de combustible necesitan por lo menos tres años más de ensayos y mejoras antes de su comercialización a gran escala. Distintos análisis económicos y medioambientales muestran que los vehículos de pila de combustible serán económicamente competitivos y medioambientalmente benignos (**Veziroglu A. et al., 2011**). De hecho, la introducción del vehículo de pila de combustible en el sector del transporte representa uno de los pasos más grandes hacia la economía del hidrógeno.

En cuanto al estudio del estado del arte de los vehículos de pila de combustible (FCVs, Fuel Cell Vehicles), se han publicado varios estudios que analizan distintos aspectos de las pilas de combustible, pero hay que tener en cuenta que los FCVs están todavía en la fase de investigación y desarrollo. La bibliografía existente sobre pilas de combustibles cubre áreas como los **mecanismos y el funcionamiento de la pila de combustible, análisis comparativo entre las pilas de combustible y otras fuentes de energía, el impacto medioambiental de los vehículos de pila de combustible, análisis económicos que justifican o desacreditan a los vehículos de pila de combustible, e incluso análisis sobre la influencia que tiene sobre la salud de las personas.**

Para analizar el estado del arte se han revisado los siguientes artículos agrupados por temática (aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible, Impacto Ambiental de los FCVs, Impacto Económico de los FCVs) y ordenados por antigüedad (*Tabla 1*):

Tabla 1. Revisión bibliográfica sobre el estado del arte de los vehículos de pila de combustible. Fuente: Elaboración propia.

Referencia bibliográfica	Publicación	Año	Palabras clave
<b>Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible</b>			
Guvelioglu Galip H., Stenger Harvey G. <b>Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells.</b> Journal of Power Sources; 2005:95-106.	Journal of Power Sources; 2005:95-106	2005	Modelo dinámico, pilas de combustible PEMFCs, mecanismo de fallo, condiciones de operación, membranas deshidratadas, dimensiones, porosidad, humedad, corrientes internas.
Cai Mei, Ruthkosky Martin S., Belabbes Merzougui, Swathy Saththirajan, Balogh Michael P., Oh Se H. <b>Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts.</b> Journal of Power Sources 160;2006:977-986.	Journal of Power Sources 160:977-986	2006	Degrado térmica y electroquímica, electrocatalizador, pérdida de rendimiento, corrosión de carbono, pérdida del área superficial del platino, efecto de la concentración de oxígeno, efecto de la humedad del gas.
Borup Rod, Meyers Jeremy, Pivovar Bryan, Seung Kim Yu, Mukundan Rangachary, Garland Nancy, et al. <b>Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation.</b> Chem. Rev. 2007; 107:3904-51.	Chem. Rev. 107:3904-51	2007	Durabilidad de la pila de combustible, degradación de la pila de combustible, influencia de las condiciones de operación, estabilidad del electrocatalizador, degradación química, degradación física.
Wu Jinfeng, Zi Yuan Xiao, Martin Jonathan J., Wang Haijiang, Zhang Jilun, Jun, Shen, Wu Shaohong, Merida Walter. <b>A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies.</b> Journal of Power Sources 2008; 184:104-19.	Journal of Power Sources 184:104-19	2008	Durabilidad, mecanismo de degradación de las PEMFC, estrategias de atenuación de degradación, coste y fiabilidad de las PEMFC, métodos de diagnóstico, instrumentos analíticos, correlación entre la degradación de los componentes individuales y la pérdida de rendimiento, modificación de la estructura de la membrana, catalizadores operando en ciclos de carga.
Department of Energy, United States of America , 2009. <b>Hydrogen and Fuel Cell Activities, Progress, and Plans.</b> Thomas CE, (1).	DOE, Department of Energy, United States of America.	2009	Objetivos para el desarrollo de las pilas PEFC utilizadas en los vehículos, configuraciones óptimas.
<b>Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles.</b> International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296.	International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296	2009	Vehículos eléctricos de batería, vehículos eléctricos de pila de combustible, infraestructura del hidrógeno, vehículos híbridos enchufables, gases de efecto invernadero, seguridad energética, simulación dinámica, biocombustibles.
Hiramatsu Y., Mitsuizawa N., Okada K., Hori M. <b>Effects of ionomer content and oxygen permeation of the catalyst layer on proton exchange membrane fuel cell cold start-up.</b> Journal of Power Sources; 2010:1038-45.	Journal of Power Sources 2010: 1038-45	2010	Iónomero portador de oxígeno, protones y agua, arranque en frío de las PEMFCs, voltaje y resistencia interna de la pila de combustible, capa del catalizador, hielo, permeabilidad de oxígeno.
Jiao Kui, Li Xianguo. <b>Cold start analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells.</b> International Journal of Hydrogen Energy; 2010:5077-94.	International Journal of Hydrogen Energy; 2010:5077-94	2010	Analisis arranque en frío, diferentes tipos de PEMFCs, cantidad de agua absorbida en la capa del cátodo y la membrana, cantidad de agua extraída, espesor de la membrana, fracción volumétrica de ionómero en la capa del catalizador, calor externo.
Maranzana Gael, Moyne Christian, Dillet Jerome, Didierjean Sophie, Olivier Lotti. <b>About internal currents during start-up in proton exchange membrane fuel cell.</b> Journal of Power Sources; 2010;195(18):5990-5.	Journal of Power Sources; 2010;195(18):5990-5	2010	Pila de combustible, corriente inversa, corriente interna, puesta en marcha, efectos capacitivos, oxidación de carbono, aumento transitorio de tensión, envejecimiento de los electrodos, ciclos de arranque y parada.

Referencia bibliográfica	Publicación	Año	Palabras clave
<b>Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible</b>			
Wu Jinfeng, Martin Jonathan J, Orfino Francesco P, Wang Haijiang, Legzdins Coleen, Yuan Xiao-Zi, Sun Colin. <b>In situ accelerated degradation of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell: part I: effect of elevated temperature and flow rate.</b> Journal of Power Sources; 2010: 1888-94.	Journal of Power Sources 2010: 1888-94	2010	Pila de combustible PEMFC, degradación acelerada de la capa de difusión del gas, efecto de temperaturas elevadas, efecto del caudal del flujo de aire y de hidrógeno, barrera, mecanismo de degradación, pérdida de material.
Zhil Miao, Hognai Yu, Wei Song, Lixing Hao, Zhigang Shao, Qiang Shen, et al. <b>Characteristics of proton exchange membrane fuel cells cold start with silica in cathode catalyst layers.</b> International Journal of Hydrogen Energy; 2010:1-6. Department of Energy, United States of America , 2011. <b>Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045.</b>	International Journal of Hydrogen Energy; 2010:1-6	2010	Mejora del rendimiento del arranque en frío de las PEMFCs, capacidad de almacenamiento de agua, capas del catalizador revestidas de SiO <sub>2</sub> , degradación.
Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. <b>Experimental and theoretical investigations on a proton Exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures.</b> Journal of Power Sources; 2009:80-8.	DOE, Department of Energy, United States of America.	2011	Mejoras en la tecnología de las pilas de combustible, reducción significativa del consumo de combustible.
Veziroglu Ayfer, Macario Rosario. <b>Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns.</b> International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011).	Journal of Power Sources; 2009:80-8.	2011	PEMFC, arranque en frío, resultados experimentales, efectos de los parámetros de operación, envejecimiento, rendimiento de la pila de combustible, degradación, efecto del nivel de humedad.
<b>Impacto ambiental de los FCVs (Fuel Cell Vehicles)</b>			
Colella WG, Jacobson MZ, Golden DM. <b>Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases.</b> Journal of Power Sources 2005;150:150-81.	Journal of Power Sources 2005;150:150-81	2005	Ánálisis de emisiones, flota de vehículos de pila de combustible, consumo de energía, gases de efecto invernadero, reformado con vapor de gas natural, hidrólisis con energía eólica, gasificación del carbón, captura del carbon.
McKinsey & Company. <b>A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis.</b>	McKinsey & Company	2011	Vehículos eléctricos de batería, vehículos híbridos "enchufables" y vehículos eléctricos de pila de combustible, evaluación, reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> , rendimiento, costes, funcionamiento, economía y medioambiente.

Referencia bibliográfica	Publicación	Año	Palabras clave
Eaves S., Eaves J. <b>A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles.</b> J Power Sources 2004;130:208-12.	Journal of Power Sources 2004; 130:208-12	2004	Coste vehículos de pila de combustible, coste vehículos eléctricos de batería, comparación, coste de fabricación, coste de repostaje.
Odgen JM, William RH, Larson ED. <b>Societal lifecycle cost comparison of cars with alternative fuels/engines.</b> Energy Policy 2004;32:7-27.	Energy Policy 2004;32:7-27	2004	Coste social total, contaminación atmosférica, cambio climático, suministro petróleo, costes externos.
Colella WG, Jacobson MZ, Golden DM. <b>Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases.</b> Journal of Power Sources 2005;150:150-81.	Journal of Power Sources 2005;150:150-81	2005	Floota de vehículos de pila de combustible, emisiones, consumo de combustible, gases de efecto invernadero.
Jacobson MZ., Colella WG, Golden DM. <b>Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles.</b> Science 2005;308:1901-5.	Science 2005;308:1901-5	2005	Aire limpio, mejora en la salud, vehículos de pila de combustible.
Granovskii M., Dincer I., Rosen MA. <b>Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles.</b> Journal of Power Sources 2006; 159:1186-93.	Journal of Power Sources 2006; 159:1186-93	2006	Comparación económica, comparación medioambiental, vehículos convencionales, vehículos híbridos, vehículos eléctricos, vehículos de pila de combustible, relación óptima, generación de electricidad a bordo.
Ajanovic A. <b>On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria.</b> International Journal of Hydrogen Energy; 2008; 42:23-34.	International Journal of Hydrogen Energy; 2008; 42:23-34	2008	Economía del hidrógeno, fuentes de energías renovables, transporte, coste del hidrógeno, coste de los vehículos de pila de combustible.
Greene DL., Leiby PN., James B., Perez J., Melendez M., Milbrant A., et al. <b>Analysis of the transition to hydrogen fuel cell vehicles &amp; the potential hydrogen energy infrastructure requirements.</b> ORNL/TM-2008/30; March 2008.	ORNL/TM-2008/30; March 2008	2008	Vehículos de pila de combustible, requerimientos de la infraestructura del hidrógeno, costes, sostenibilidad.
Lee JY, Yoo M, Cha K, Lim TW, Hur T. <b>Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel.</b> Int J Hydrogen Energy 2009; 34:4243-55.	International Journal of Hydrogen Energy 2009; 34:4243-55	2009	Ánalisis del coste del ciclo de vida del hidrógeno, combustible alternativo, costes "well-to-tank", costes "tank-to-wheel", costes externos de la emisión de gases y del efecto invernadero, precio del FCV, capacidad de producción, eficiencia del combustible.
Stephens-Romero S., Carreras-Sospedra M., Brouwer J., Dabdub D., Samuelsen S. <b>Determining air quality and greenhouse gas impacts of hydrogen infrastructures and fuel cell vehicles.</b> Environ Sci Technol 2009; 43:9022-9.	Environ Sci Technol 2009; 43:9022-9	2009	Calidad de aire, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, infraestructuras de hidrógeno, vehículos de pila de combustible.

Referencia bibliográfica	Publicación	Año	Palabras clave
<b>Análisis económico de los FCVs (Fuel Cell Vehicles)</b>			
Thomas CE, (1). <b>Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles.</b> International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296.	International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296	2009	Vehículos eléctricos de batería, vehículos eléctricos de pila de combustible, infraestructura del hidrógeno, vehículos híbridos enchufables, gases de efecto invernadero, seguridad energética, simulación dinámica, biocombustibles.
Thomas CE, (2). <b>Fuel cell and battery electric vehicles compared.</b> International Journal Hydrogen Energy 2009;34:6005-20.	International Journal Hydrogen Energy 2009;34:6005-20	2009	Comparación, vehículos eléctricos de pila de combustible, vehículos eléctricos de batería, reducción en la contaminación atmosférica, emisiones de efecto invernadero, consumo de combustible.
Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. <b>Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system.</b> Energy Policy 2010;38:24-9.	Energy Policy 2010;38:24-9	2010	Costes de ciclo de vida, vehículos de pila de combustible, consumo de energía, emisiones gases de efecto invernadero, análisis de costes, costes iniciales de los vehículos, costes de funcionamiento, costes externos.
Yongling Sun, Joan Ogden, Mark Delucchi. <b>Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles.</b> International Journal of hydrogen energy 35 (2010) 11932-11946.	International Journal of hydrogen energy 35 (2010) 11932-11946.	2010	Coste social del ciclo de vida, vehículos de pila de combustible, coste del vehículo, coste del combustible, coste de operación y mantenimiento.
Department of Energy. United States of America. <b>2011 Fuel Technologies Market Report.</b> July 2012.	DOE, Department of Energy, United States of America.	2012	Coste pila de combustible, contenido de platino, durabilidad de las pilas de combustible, coste de producción y distribución del hidrógeno, coste del ciclo de vida.

## **2.1. Aspectos técnicos relativos al desarrollo de la Pila de Combustible.**

A continuación se presenta un resumen de los distintos estudios analizados sobre los aspectos técnicos relativos al desarrollo de la pila de combustible, que se han detallado en la primera sección de la tabla anterior.

***Guvelioglu Galip H., Stenger Harvey G. Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources; 2005:95-106.***

En recientes estudios se ha analizado la durabilidad de las PEFCs (Proton Exchange Fuel Cells) en aplicaciones de vehículos, y esto es un buen indicador del progreso hacia los FCVs. *Guvelioglu et al.* desarrollaron distintos modelos de simulación dinámica del fluido de pilas de combustible con el objeto de analizar los mecanismos de fallo para generar unos modelos más exactos que permitan predecir la vida de la pila. Se investigó el contenido de agua en la membrana y se identificaron las condiciones de operación en las que la membrana se deshidrata. Por otro lado, se evaluaron los efectos que tienen las dimensiones de la pila (anchura del canal y dimensiones de la placa bipolar), la porosidad y la humedad relativa de los flujos de entrada a la pila sobre el rendimiento de la pila de combustible. Se obtuvo como resultado que se necesitan unos canales y unas placas bipolares de menor anchura para operaciones de elevada densidad de corriente. Como el área del electrodo bajo la placa bipolar aumenta, la pila de combustible obtiene mayor beneficio de la elevada porosidad de los electrodos. Por otro lado, se obtuvo como resultado que la humedad relativa de la corriente de gas del ánodo es más crítica sobre el rendimiento de la pila de combustible que la humedad relativa del gas del cátodo.

***Cai Mei, Ruthkosky Martin S, Belabbes Merzougui, Swathy Swathirajan, Balogh Michael P, Oh Se H. Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts. Journal of Power Sources 160; 2006:977-986.***

En este estudio se simularon experimentalmente distintos procesos de degradación tales como la corrosión de carbono y la pérdida del área superficial del Platino (Pt) mediante un protocolo de sinterización térmica acelerada. Se trataron dos tipos de catalizador de pila de combustible Tanaka a 250 °C en corrientes humidificadas de Helio (He) y distintas concentraciones de oxígeno (O<sub>2</sub>).

Resumiendo *Cai Mei et al. (2006)* llegaron a las siguientes conclusiones:

- La corrosión del carbono y la pérdida del área superficial del platino, observado en los electrocatalizadores durante largos períodos de operación, pueden simularse mediante experimentos a temperatura elevada (250°C) y en un entorno que contenga una concentración de aproximadamente 0,7% de oxígeno y 8% de agua y helio. La revisión acelerada de catalizadores no puede hacerse en concentraciones de oxígeno <0,05%.

- La pérdida de superficie de platino durante 10 h de degradación térmica fue equivalente a la degradación electroquímica observada en 500 ciclos de un electrodo de Pt/Vulcan de Tanaka ensayado entre 0 y 1,2 V. Por otro lado, la pérdida de carbono observada durante 5 h de degradación térmica fue comparable a la pérdida de masa observada durante 86 h a 1,2 V y 95°C para los mismos catalizadores.
- Los estudios sobre el efecto de la concentración de oxígeno y del agua en dos catalizadores Tanaka revelaron que la oxidación de carbono en presencia de Pt sigue dos vías: una vía de oxígeno que conduce a la pérdida de masa debido a la formación de productos gaseosos y una vía de agua que conduce a un aumento de masa.
- La pérdida de área superficial de Platino, medida para distintas concentraciones de oxígeno y como una función del tiempo de sinterización, revela que se produce una gran corrosión del carbono en lugar de un aumento del tamaño de partícula de Pt para la pérdida superficial.

**Borup Rod, Meyers Jeremy, Pivoar Bryan, Seung Kim Yu, Mukundan Rangachary, Garland Nancy, et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation. Chem. Rev. 2007; 107:3904-51.**

*Borup et al.* llevaron a cabo un estudio exhaustivo sobre la degradación de la pila de combustible, analizándose la durabilidad, una de las principales barreras en la comercialización de las pilas de combustible PEMFC. En el desarrollo de las pilas de combustible deben analizarse conjuntamente la durabilidad y el coste, ya que están interrelacionados. Como la tecnología ha avanzado en términos de coste y rendimiento de las pilas de combustible, actualmente se pone más énfasis en la durabilidad. Por ejemplo, si se añade más catalizador a la celda de combustible aumenta la vida útil del catalizador pero también aumenta el coste de la pila de combustible, del mismo modo el aumento del espesor de la membrana de la pila de combustible aumenta su vida útil pero también su coste y reduce su rendimiento. Para mejorar la durabilidad de las pilas de combustible PEM, los investigadores están estudiando los factores que determinan la vida de una PEMFC, para ver aquellos que permiten incrementar la vida útil de la pila sin aumentar su coste o perder su rendimiento.

Varios estudios muestran que hay factores que pueden reducir la vida útil de las PEMFC, incluyendo la disolución de partículas de platino y la sinterización, la corrosión con carbono, y el adelgazamiento de la membrana. La vida útil también se puede reducir al incrementar el rendimiento inicial de los componentes de la pila de combustible. Por ejemplo, disminuyendo el espesor del electrolito polimérico se disminuye la resistencia de la membrana pero también se aumenta la absorción de agua y la permeabilidad del gas que degrada sus propiedades mecánicas. Las condiciones bajo las cuales opera una pila de combustible o a las que se expone también pueden afectar a su rendimiento y vida útil. Dentro de estas condiciones se incluyen las impurezas en el combustible o los caudales de oxidante, la temperatura de la pila de combustible, su voltaje y corriente, las presiones del combustible y los

caudales de oxidante y el hecho de que la pila de combustible opere continuamente o no, como ocurre durante la puesta en marcha y la parada.

Por otro lado, los modos de fallo de las PEMFC han sido recientemente motivo de estudio, mientras que las causas y mecanismos de degradación de la pila de combustible han recibido menos atención. Por este motivo en este estudio se lleva a cabo una revisión de los conocimientos que existen en la actualidad sobre degradación de las PEMFC.

Normalmente las PEMFC presentan una disminución gradual de su potencia, pudiendo llegar con el tiempo a no poder proporcionar la potencia necesaria. Hay que conocer a qué se debe esta degradación para mejorar sus diseños utilizando nuevos materiales que permitan aumentar la durabilidad de las PEMFC. En los últimos años se han incrementado los estudios sobre la degradación de las PEMFC, algunos de estos estudios revelaron la degradación de ciertos materiales utilizados que antes se consideraban inmunes a la corrosión y a la descomposición, tales como el platino (metal del catalizador), el ionómero conductor de protones (utilizado en la membrana y en la capa del catalizador), carbono/grafito (utilizado en el soporte del catalizador, en la capa de difusión del gas (GDL) y en la placa bipolar), y el Teflón (utilizado en la GDL).

Ante la escasez de estudios de revisión sobre la durabilidad de la pila de combustible, *Borup et al.* revisaron la durabilidad de las PEMFC, los métodos de prueba de la durabilidad, y la influencia de las condiciones de operación sobre la durabilidad. Se centraron en los distintos componentes: membranas, soportes de los electrocatalizadores y los medios de difusión del gas.

***Wu Jinfeng, Zi Yuan Xiao, Martin Jonathan J, Wang Haijiang, Zhang Jiujun, Jun, Shen, Wu Shaohong, Merida Walter. A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies. Journal of Power Sources 2008; 184:104-19.***

Este estudio llevó a cabo una revisión de las distintas publicaciones sobre la degradación de las PEFC. La durabilidad, el coste y la fiabilidad de las pilas de combustible PEM están retrasando su comercialización. La durabilidad es una de las características más importantes para que las PEFC sean viables e influye sobre los otros dos aspectos comentados. Se han llevado a cabo investigaciones sobre los mecanismos de degradación de los sistemas de pilas de combustible y de sus componentes en un intento por mejorar la durabilidad de las pilas de combustible. Sin embargo, los conocimientos que se tiene en la actualidad sobre los mecanismos de degradación de componentes de las pilas de combustible son todavía insuficientes. Se concluye que hay que poner más énfasis en los métodos de diagnóstico y en los instrumentos analíticos. Por otro lado, se concluye que hay una falta de información sobre la correlación entre la degradación de los componentes individuales y la pérdida de rendimiento. Después de este análisis, el estudio se centró en las estrategias

necesarias para reducir la tasa de degradación de cada componente. Se establece la vida de la PEFC como función de las condiciones de operación, los componentes y los mecanismos de degradación.

Con respecto a la durabilidad de la membrana en este estudio se concluyó que se consiguen grandes logros mediante la modificación de la estructura de la membrana para mejorar su estabilidad química/electroquímica y mediante el uso de un politetrafluoroetileno para reforzar la membrana y así mejorar su estabilidad mecánica. Pero hacen falta más mejoras para que funcione correctamente en las aplicaciones del automóvil y no sólo en estado de equilibrio. De la misma manera los catalizadores deben poder operar en las duras condiciones de un vehículo, tales como los ciclos de carga. Con los materiales utilizados en la actualidad el catalizador se deteriora y no puede cumplir los objetivos establecidos por DOE (US: Department of Energy). Además de la optimización de los materiales utilizados y una mejor compresión de los mecanismos de degradación es necesario reducir la disolución de Pt y la corrosión del carbono. Se sugiere utilizar catalizadores de aleación de Pt con una alta resistencia a la oxidación electroquímica.

***Department of Energy. United States of America. Hydrogen and fuel cell activities, progress, and plans. Report to Congress. January 2009.***

El departamento de energía de los Estados Unidos ha establecido unos objetivos para el desarrollo de las pilas PEFC utilizadas en los vehículos. Para el año 2015, se espera que las pilas PEFC en los vehículos tengan una eficiencia del 60% y un coste de 30 US\$/kW (23,28 €/kW). Además se espera que tengan una vida útil nominal de al menos 5.000 h, que es equivalente a 241.402 km (150.000 millas) circulando a 48,28 km/h (30millas/h). Por otro lado, algunos investigadores están tomando datos de pilas de combustible existentes y las están comparando entre sí para determinar qué configuraciones son óptimas.

***Thomas CE, (1). Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles, International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296.***

En este estudio llevado a cabo por Thomas CE se han previsto los distintos métodos de producción de hidrógeno. El hidrógeno puede ser reformado a partir de combustibles fósiles, producido mediante la electrólisis del agua, o puede ser extraído mediante la gasificación de la biomasa. Los FCVs pueden bien almacenar hidrógeno de una estación de repostaje o producirlo a bordo. Las distintas fuentes de hidrógeno para el transporte se muestran en la siguiente figura (Fig.1).

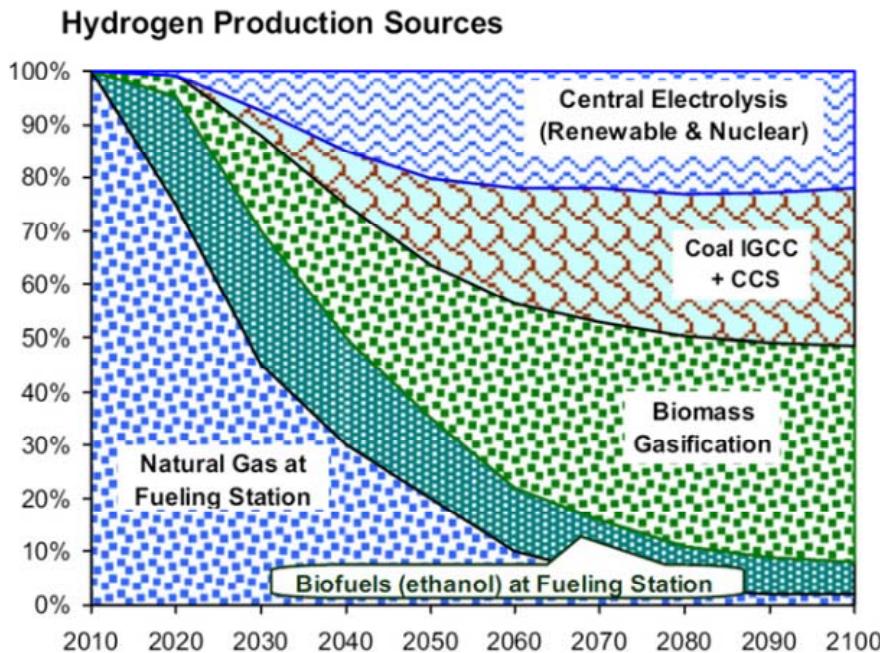


Fig.1. Fuentes de hidrógeno durante el siglo, comenzando con el hidrógeno distribuido obtenido del reformado del gas natural en una estación de repostaje; seguido del reformado de biofueles como es el etanol celulósico; producción central del hidrógeno mediante la gasificación de la biomasa, gasificación del carbón en un ciclo combinado (IGCC, Integrated gasification combined cycle) con captura y almacenaje de carbón (CCS, Carbon capture and storage), y electrólisis a partir de fuentes renovables y nucleares. Fuente: Thomas CE (1), (2009).

**Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. Experimental and theoretical investigations on a proton Exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures. Journal of Power Sources; 2009:80-8.**

La formación de hielo/escarcha en una pila de combustible PEMFC que opera a temperaturas bajo cero puede provocar el apagado durante el arranque. Por este motivo, Pinton et al. (2009) llevaron a cabo ensayos isotérmicos en células individuales de 220 cm<sup>2</sup> en distintas condiciones de funcionamiento con el objeto de investigar el comportamiento del “arranque en frío”. Se analizaron distintos parámetros:

- el agua que contenía la membrana inicialmente.
- la tensión de operación.
- la temperatura de la pila.
- la corriente de la pila.

En cuanto a la influencia de las condiciones se concluyó que:

- Existe un nivel óptimo de humedad del núcleo de la pila de combustible para el cuál el calor acumulado generado por la reacción electroquímica es máximo. El análisis de la gestión del agua de la membrana junto con la medición de la

resistencia de la pila ha permitido interpretar la evolución del rendimiento de la pila de combustible.

- El fallo de la pila de combustible por alimentación no solamente es debido a la formación de hielo en los poros de la capa del cátodo (hecho que dificulta el transporte del oxígeno), sino que también es debido a la formación de hielo en lugares activos de la reacción que incrementan la resistencia eléctrica de la pila. Ambos factores reducen el rendimiento de la pila de combustible bajo carga.
- Es preferible partir de una tensión baja ( $0,3 < U_{cell} < 0,5$  V) para obtener el máximo beneficio de la generación de calor.
- El punto de congelación del agua dentro de la capa catalítica del cátodo es -4°C por lo que la pila de combustible experimenta un fallo cuando se reinicia si la temperatura es mayor que este punto.
- La pila de combustible hecha de láminas metálicas delgadas y previamente secada debería ser capaz de auto-arrancarse en menos de 30 segundos, para una temperatura inicial de -10 °C. Pero esto no sería posible para una temperatura de -20 °C.

Después de cada parada y puesta en marcha a temperatura bajo cero, se obtuvo la curva de polarización en condiciones nominales (80°C) para cuantificar la degradación del rendimiento de la pila de combustible. Se concluyó que el rendimiento para el arranque en frío llevado a cabo a -10°C se reduce menos del 1% para arranque en frío a  $0,5 \text{ A/cm}^2$  y un 2% para arranque en frío a  $0,75 \text{ A/cm}^2$  (ver Fig.2)

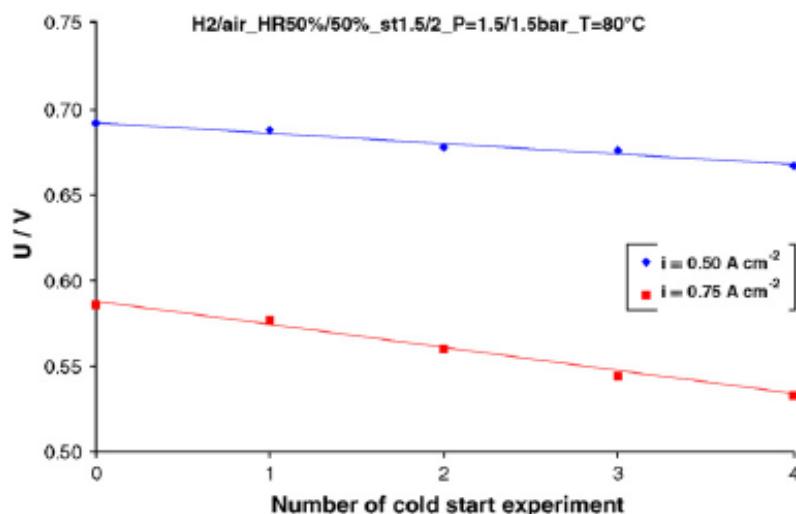


Fig.2. Evolución del rendimiento de la pila de combustible condiciones nominales después de cada arranque en frío.

Esto es característico de la limitación de difusión del gas hacia los lugares catalíticos. De acuerdo a la literatura, este comportamiento se puede alcanzar a partir de dos fenómenos:

- Las capas de membrana del electrodo llegan a ser más hidrófilas debido a la pérdida de PTFE (politetrafluoruroetileno) y/o a las alteraciones de la estructura debidas a la expansión del hielo.
- Una capa de agua aparece después de la fusión del agua que tapa los poros.

**Hiramitsu Y., Mitsuzawa N., Okada K., Hori M. Effects of ionomer content and oxygen permeation of the catalyst layer on proton exchange membrane fuel cell cold start-up. Journal of Power Sources; 2010:1038-45.**

En este estudio se comprobó la eficacia de un ionómero como portador de oxígeno para mejorar el arranque en frío de pilas de combustible PEFCs. Se llevó a cabo un arranque en frío galvanostático (densidad de corriente se mantiene constante) en la PEFC para evaluar el efecto que tiene el ionómero presente en la capa del catalizador sobre la durabilidad de la generación de potencia a -30 °C. Se midieron el voltaje de la pila y la resistencia interna, y se llevó a cabo el análisis de la polarización para evaluar la reducción de voltaje de la pila. El comportamiento en arranque en frío y la durabilidad mejoraron significativamente al aumentar el contenido de ionómero en la capa del catalizador debido a la mayor permeabilidad del oxígeno debida al hielo formado en la capa del catalizador. Estos resultados permiten el diseño robusto de conjuntos de electrodos de membrana para el arranque en frío. Por lo que los resultados muestran la importancia del ionómero como portador de oxígeno, de protones y de agua.

**Jiao Kui, Li Xianguo. Cold start analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:5077-94.**

El arranque en frío es un aspecto fundamental para la comercialización de las PEFCs para aplicaciones en la automoción. En este estudio se analizaron los procesos de arranque en frío para varios tipos de PEMFC simuladas numéricamente.

El éxito del proceso de arranque en frío depende de la relación entre la rapidez con la que la pila se calienta hasta la temperatura del punto de congelación y la rapidez con la que se forma el hielo y se acumula en los poros de la capa del catalizador del cátodo bloqueando, de este modo, el transporte de oxígeno a los sitios en los que tiene lugar la reacción. Por lo tanto el éxito del proceso de arranque en frío depende:

- Del agua producida que se absorbe en el ionómero en la capa del cátodo y la membrana.
- Del agua que se obtiene en forma de vapor a partir de los flujos de gas.
- Del agua que se congela en los poros de la capa del catalizador.

Se concluye que el espesor de la membrana y la fracción volumétrica del ionómero en la capa del catalizador desempeñan un papel fundamental en la reducción de la cantidad de hielo formado. Una membrana más gruesa conlleva a una mayor capacidad de absorción de agua pero con un proceso de absorción más lento, y el

aumento de la fracción volumétrica del ionómero aumenta la capacidad de absorción de agua del ionómero y mejora la absorción de agua que tiene la membrana. Arrancar la pila a voltaje constante (“potentiostatic condition”) es mejor que arrancarla a corriente constante (“galvanostatic condition”). El calentamiento de las superficies externas y del aire de entrada incrementa la temperatura de la pila de combustible. Sin embargo, el calentamiento externo conlleva una pequeña reducción de la cantidad de hielo formado. A pesar de que el calentamiento del aire de entrada es más eficaz para aumentar la temperatura de la pila de combustible que el calentamiento de las superficies externas, la capacidad de calentamiento del aire de entrada es baja.

**Maranzana Gael, Moyne Christian, Dillet Jerome, Didierjean Sophie, Olivier Lottin. About internal currents during start-up in proton exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources; 2010;195(18):5990-5.**

*Maranzana et al. (2010)* llevaron a cabo un estudio experimental y numérico sobre las corrientes internas que se producen durante la puesta en marcha de las pilas de combustible, dichas corrientes podían alcanzar valores mayores de 1 A/cm<sup>2</sup>. Este modelo muestra que la aparición de corrientes internas se debe principalmente a los efectos capacitivos (carga y descarga de la capacitancia de la doble capa), la oxidación del carbono aunque se produce al mismo tiempo, no tiene una gran influencia sobre las corrientes internas. También se explica el aumento transitorio de tensión (por encima del voltaje de circuito abierto en estado estacionario) que a veces se observa experimentalmente después de que la pila de combustible se pone en marcha. En un futuro próximo, se utilizará este modelo para estimar la tasa de oxidación del carbono en la pila de combustible en función de la velocidad del hidrógeno. En paralelo, el envejecimiento local de los electrodos se caracterizará experimentalmente después de someter la pila de combustible a ciclos de arranque y parada.

**Wu Jinfeng, Martin Jonathan J, Orfino Francesco P, Wang Haijiang, Legzdins Colleen, Yuan Xiao-Zi, Sun Colin. In situ accelerated degradation of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell: part I: effect of elevated temperature and flow rate. Journal of Power Sources; 2010: 1888-94.**

Estudios anteriores han mostrado que tanto el sustrato como la capa microporosa de la capa de difusión del gas (GDL, Gas Diffusion Layer) afectan sobre el balance del agua y el rendimiento de una pila con membrana de intercambio de protones. Se han hecho pocos esfuerzos por investigar la importancia de las propiedades de GDL sobre la durabilidad de las pilas de combustible PEM. *Wu Jinfeng et al. (2010)* analizaron la degradación de una GDL bajo unas condiciones de elevada temperatura y elevado caudal de flujo. Para evitar el impacto de la capa del catalizador durante el ensayo del catalizador se utilizaron diferentes barreras para aislar el ánodo del cátodo. Los resultados que obtuvieron fueron que la pérdida del material juega un papel muy importante en los mecanismos de degradación de la GDL, mientras que una tensión excesiva antes de la degradación debilita la estructura de la GDL y cambia su

propiedad física, lo que acelera la pérdida de material del GDL durante el envejecimiento.

**Zhili Miao, Hogmei Yu, Wei Song, Lixing Hao, Zhigang Shao, Qiang Shen, et al. Characteristics of proton exchange membrane fuel cells cold start with silica in cathode catalyst layers. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:1-6.**

En este estudio se presentó una nueva estrategia para mejorar el rendimiento del arranque en frío de las PEMFCs a temperaturas bajo cero. Para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua se añade un nano-óxido hidrófilo, como puede ser el SiO<sub>2</sub>, a la capa del catalizador del cátodo. Para investigar el efecto que tiene el hecho de añadir SiO<sub>2</sub>, se han fabricado las membranas del catalizador revestidas con un 5 % en peso de SiO<sub>2</sub> y sin esta capa. Aunque en condiciones normales de operación, el rendimiento de la pila con SiO<sub>2</sub> no es tan bueno como en el caso que no lleva esta capa (*Fig.3*), las pruebas de arranque en frío muestran que añadiendo SiO<sub>2</sub> hace que la pila sea capaz de arrancar y funcionar incluso a 100 mA/cm<sup>2</sup> y -8°C durante 25 minutos, mientras que en el caso de la pila sin SiO<sub>2</sub> el voltaje cae al momento de arrancar en frío. Incluso en pruebas a -10°C el rendimiento mejora para el caso de la pila con SiO<sub>2</sub> (*Fig.4.a* y *Fig.4.b*).

Para ilustrar el efecto de la densidad de corriente en el proceso de arranque en frío se han comparado los distintos resultados obtenidos (*Fig.4.a* y *Fig.4.b*). La pila sin SiO<sub>2</sub> deja de funcionar en 1 minuto para densidades de corriente de 100 y 200 mA/cm<sup>2</sup>, y a los 15 minutos para el caso de densidades de corriente de 80 mA/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, para el caso de la pila de combustible con SiO<sub>2</sub>, puede arrancar a -8°C y 50 mA/cm<sup>2</sup> y funcionar durante el tiempo que dure la investigación.

Por lo que se concluye que el proceso de arranque en frío depende de la capacidad de almacenamiento de agua que tiene el cátodo. En el caso de densidades de corriente bajas, la corriente se distribuye uniformemente por los poros de la capa del catalizador y la capacidad de retener agua de la capa del catalizador podría utilizarse. Sin embargo, en el caso de densidades de corriente elevadas, la corriente no se distribuye uniformemente. El agua se produce antes y hay menos tiempo disponible para transferir el agua producida a la membrana. Por lo tanto, se concluye que la formación de hielo era más severa en la capa del catalizador del cátodo en el caso de densidades de corrientes elevadas.

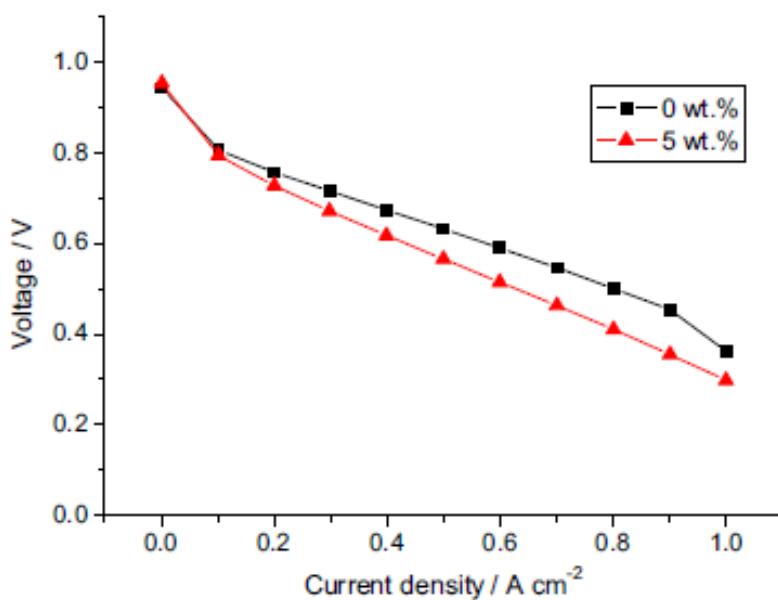


Fig.3. Rendimiento inicial de dos pilas: con 5% de SiO<sub>2</sub> en la capa del catalizador del cátodo (gráfica roja), sin SiO<sub>2</sub> en la capa del catalizador del cátodo (gráfica negra). (Fuente: Zhili Miao et al. (2010)).

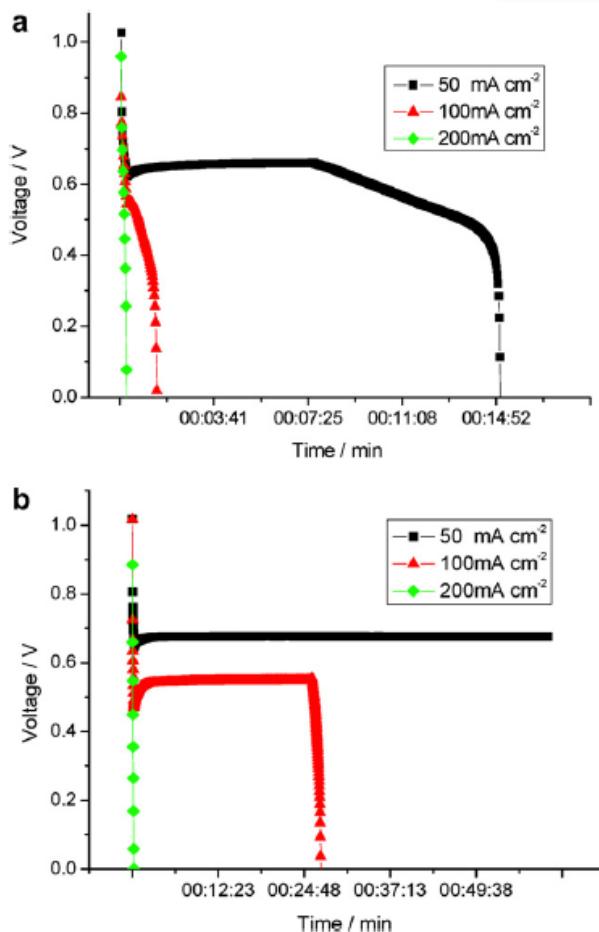


Fig.4. Procesos de arranque en frío de pilas después de diferentes ciclos de arranque en frío: a) sin capa de SiO<sub>2</sub> y b) con capa de 5% de SiO<sub>2</sub>. (Fuente: Zhili Miao et al. (2010)).

**Department of Energy, United States of America , 2011. Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045.**

En julio de 2011, el DOE (Departmet of Energy, United States of America) publicó un informe titulado “Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045” (**Department of Energy, United States of America ,2011**). Tras la realización del informe se obtuvo como conclusión que una serie de mejoras en la tecnología de la pila de combustible darán lugar a una reducción significativa del consumo de combustible. Como se muestra en la *Tabla 2*, se obtuvo como resultado que el uso de la pila de combustible en diversas configuraciones de vehículos eléctricos se traducirá en una mayor reducción del consumo de combustible en comparación con los vehículos de gasolina. El informe llegó a la conclusión de que los vehículos eléctricos de batería serán caros en un futuro y a largo plazo los vehículos de pila de combustible conseguirán tener un precio competitivo.

*Tabla 2. Porcentaje de reducción de consumo de combustible (millas/galón de gasolina equivalente o mpg<sub>equiv</sub>) en el año 2045, comparado con el coche de gasolina convencional del año 2010. Fuente: Department of Energy, United States of America, 2011.*

Combustible	Convencional	HEV	PHEV10	PHEV40
<b>Gasolina</b>	2-43	37-64	49-70	64-81
<b>Diesel</b>	16-42	42-62	51-69	65-80
<b>Motor de combustión interna de hidrógeno</b>	4-41	50-67	56-73	69-82
<b>Etanol</b>	1-47	32-62	46-69	62-80
<b>Pila de combustible</b>		57-70	62-75	77-84

Convencional: Vehículo de gasolina del año 2010.

HEV: Vehículo eléctrico híbrido.

PHEV10: Vehículo eléctrico híbrido enchufable con autonomía eléctrica de 10 millas (16,093 km).

PHEV40: Vehículo eléctrico híbrido enchufable con autonomía eléctrica de 40 millas (64,372 km).

**Veziroglu Ayfer, Macario Rosario. Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011).**

En este estudio se concluyó que para las aplicaciones de vehículos parece que las pilas de combustible más apropiadas son las de membrana de intercambio de protones (PEM o PEFC). Aunque se sigue investigando para obtener los puntos óptimos de operación y el control automático, para que las pilas de combustible arranquen en frío en condiciones de baja temperatura y para mejorar otras características de operación. La degradación y la durabilidad parece que van a ser unos aspectos críticos para el uso práctico de las pilas de combustible. El análisis del proceso específico por el cuál una pila de combustible se degrada en un vehículo con el paso del tiempo abre un nuevo campo de investigación.

## 2.2. Impacto ambiental de los FCVs

La investigación sobre el **impacto ambiental** de los FCVs es un tema de interés. La mayoría de los estudios comparan las emisiones de la cadena de producción de hidrógeno con las emisiones de la cadena de producción de un combustible fósil. La reducción de emisiones es la verdadera ventaja de los FCVs sobre las tecnologías basadas en combustible fósil. En casi todos los casos, las cantidades netas de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), de volátiles orgánicos compuestos (COV), de partículas, de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y de monóxido de carbono (CO) disminuirán significativamente. Las emisiones de carbón se reducirán a cero mientras que habrá casi cero emisiones de  $\text{NO}_x$  (**Colella et al., 2005**).

**Colella WG, Jacobson MZ, Golden DM. Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. J. Power Sources 2005;150:150-81.**

El estudio llevado a cabo por Colella et al. examinó las emisiones de energía al sustituir la flota actual de vehículos de combustible fósiles (FFOV) por vehículos eléctricos híbridos y vehículos de pila de combustible de hidrógeno (HFCV). Las emisiones y el uso de energía se analizó en tres escenarios diferentes para el caso de vehículo de pila de combustible: que el hidrógeno se produzca a partir del reformado con vapor de gas natural, mediante hidrólisis con energía eólica, y mediante la gasificación del carbón. Se obtuvieron tres resultados importantes, en primer lugar la sustitución de los vehículos FFOV por HFCV reduce considerablemente la emisión de contaminantes debido a la eliminación de los productos de la combustión en los motores de combustión interna y la reducción de las emisiones en el procesamiento del petróleo. Se reduce incluso los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los compuestos orgánicos volátiles (COV), las partículas suspendidas, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el monóxido de carbono (CO). En segundo lugar, esta sustitución también puede reducir el impacto del calentamiento global por los gases de efecto invernadero y partículas (medido en emisión de dióxido de carbono equivalente) un 6, 14, 24 y 1% respectivamente, en el caso de vehículo híbrido, vehículo de hidrógeno producido a partir de reformado, vehículo de hidrógeno producido mediante hidrólisis con energía eólica y vehículo de hidrógeno producido con gasificación del carbón. Por último, aunque los vehículos de pila de combustible sean alimentados por combustibles fósiles como el gas natural, no se captura carbón, y el 1% del metano en el gas materia prima se filtra al medio ambiente, este escenario todavía alcanza una reducción del 14 % del  $\text{CO}_2$  equivalente a las emisiones de gas invernadero y reduce la contaminación del aire. Este resultado se obtiene a partir de: (1) la baja cantidad de carbono en el gas natural por unidad de energía de combustible en comparación con la gasolina o el diesel, (2) alta eficiencia de conversión de energía en la conversión de gas natural a hidrógeno mediante las reacciones de reformado con vapor, (3) mayor eficiencia del accionamiento eléctrico sobre el mecánico, (4) la mayor eficiencia y el menor nivel de emisiones de los sistemas de pila de combustible sobre los motores de combustión interna.

***McKinsey & Company. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis, 2011.***

En el año 2011 se llevó a cabo un estudio encargado por **McKinsey & Company** en el que se evalúa el papel de los distintos vehículos (vehículos eléctricos de batería, vehículos híbridos “enchufables” y vehículos eléctricos de pila de combustible) en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del transporte por carretera para el año 2050.

Este estudio está basado en datos proporcionados por las empresas participantes (maneja >10.000 datos empresariales confidenciales), pertenecientes a distintos sectores, estos datos incluyen información sobre costes (costes de vehículos, gastos de funcionamiento, combustibles y costes de infraestructura), el rendimiento, la eficiencia y las emisiones. También presenta un análisis del pozo a la rueda.

Dicho estudio concluye que la instalación de una infraestructura de hidrógeno está justificada y es factible, con una inversión inicial en infraestructura relativamente bajo. También concluye que los vehículos eléctricos de pilas de combustible y de baterías tendrán un coste competitivo con los vehículos de motor de combustión interna en el año 2025 y a partir de 2020 si se aplican incentivos fiscales.

Los costes de la infraestructura de hidrógeno son comparables a los costes de una infraestructura de carga para los vehículos eléctricos de batería y para los vehículos híbridos “enchufables”.

En este informe (**McKinsey & Company**) se analizan tres características de los vehículos: funcionamiento, economía y medio ambiente, los vehículos eléctricos de pila de combustible han obtenido una calificación elevada.

Concluye lo siguiente sobre los vehículos de pila de combustible de hidrógeno actuales:

- Han reducido las pérdidas de calor y el calor remanente se utiliza para el control climático del vehículo.
- Los prototipos han demostrado que se puede mantener un nivel de humedad adecuado en las membranas sin necesidad de un humidificador externo.
- Los ensayos de actuaciones en bajas temperaturas han demostrado que el arranque en frío y las actuaciones de conducción son equivalentes a las de los MCI.
- La eficiencia neta de los “stacks” ha alcanzado el 59%, con mejoras adicionales que llevan a un menor tamaño y un coste más bajo.
- Los ensayos de durabilidad han demostrado que se puede mantener una eficiencia aceptable del “stack” durante el tiempo de vida del vehículo.
- La innovación en materiales permite almacenar H<sub>2</sub> a 700 bar lo que incrementa la autonomía aproximándose a la de los MCI.
- El rango de voltaje del “stack” ha mejorado. Con las baterías suministrando potencia pico adicional se ha incrementado la durabilidad y eficiencia del stack.

- Los requerimientos de catalizador se han reducido significativamente hasta 2-6 veces la carga del convertidor catalítico de los MCI convencionales. El Platino en las pilas de combustible es altamente reciclabl.
- Los sistemas actuales de pilas de combustible se integran en el vehículo sin comprometer el volumen de carga ni el peso del vehículo.
- En cuanto al coste de los materiales, hacia el año 2020 se alcanzarán costes aceptables mediante simplificaciones del diseño, reducción del uso de materiales, tecnologías de producción y economías de escala.

### 2.3. Análisis económico de los FCVs

Por otro lado el análisis ambiental puede venir acompañado de un **análisis económico** para analizar la viabilidad de mercado de los FCVs. La tecnología de pila de combustible se está teniendo en cuenta actualmente por expertos de marketing con el objeto de determinar la mejor estrategia de comercialización y crecimiento de la economía de los FCVs.

A continuación se muestra un resumen de cada uno de los estudios sobre análisis económico de los vehículos de pila de combustible analizados.

**Eaves S., Eaves J. A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. J Power Sources 2004;130:208-12.**

Se trata de un estudio sobre comparación de coste de los vehículos de pila de combustible y de los vehículos eléctricos que concluye que un vehículo eléctrico de batería es más eficiente, limpio y menos caro en términos de coste de fabricación y de coste de repostaje.

Se compara las tecnologías de vehículo eléctrico de batería y de vehículo de pila de combustible basándose en un modelo de vehículo capaz de suministrar 100 kW de potencia pico y 60 kWh de energía total a las ruedas. Esto se traduce en un vehículo que tiene una autonomía de 300 kilómetros y capaz de generar una potencia de 137 CV. Las características de este vehículo son similares a las de un vehículo de tamaño medio como puede ser el Honda Civic. En este estudio en primer lugar, se comparó la eficiencia relativa de los vehículos realizando un análisis del “pozo a la rueda” (well-to-wheel). A continuación se calculó el volumen, el peso y los costes de abastecimiento asociados a cada vehículo, para ello se citaron estudios llevados a cabo. Se llevaron a cabo estos cálculos suponiendo que tanto el hidrógeno para el vehículo de pila de combustible como la electricidad para el vehículo eléctrico de batería se generaron utilizando fuentes de combustible no fósiles. También se calculó el caso en el que el hidrógeno es reformado a partir de gas natural y el caso en el que la electricidad se genera utilizando una mezcla de combustible fósil y combustible no fósil, como son la eólica y la hidroeléctrica.

Los resultados mostraron que utilizando una economía basada en la energía renovable, los vehículos de pila de combustible necesitan una producción de 2,4 a 2,6 veces mayor que la energía necesaria para un vehículo eléctrico de batería. El sistema

de propulsión del FCV (vehículo de pila de combustible) pesa un 43% más que el sistema utilizado en un BEV (vehículo eléctrico de batería), ocupa casi tres veces más de espacio en el vehículo para generar la misma potencia y cuesta aproximadamente un 46% más. Además, en el caso del FCV la recarga del combustible es casi tres veces mayor.

Ogden JM, William RH, Larson ED. Societal lifecycle cost comparison of cars with alternative fuels/engines. *Energy Policy* 2004;32:7-27.

Odgen *et al.* llevaron a cabo uno de los pocos estudios que estiman el coste social total (incluye el coste residual del vehículo, el coste de la energía utilizada, costes de operación y mantenimiento, costes externos del uso del combustible, costes de daños por ruido y emisiones desde contaminantes atmosféricos hasta gases de efecto invernadero, y otros factores) de varias alternativas a los combustibles basados en petróleo. Utilizaron el “coste social del ciclo de la vida” para comparar distintas opciones de motor de automóvil y de combustible que pretenden dar respuesta a problemas relacionados con la contaminación atmosférica, el cambio climático y la inseguridad de suministro de petróleo. Para elevadas externalidades, los FCVs con hidrógeno derivado de los combustibles fósiles con captura de CO<sub>2</sub> tendrán el menor coste social de ciclo de la vida entre todas las opciones (*Fig.5*).

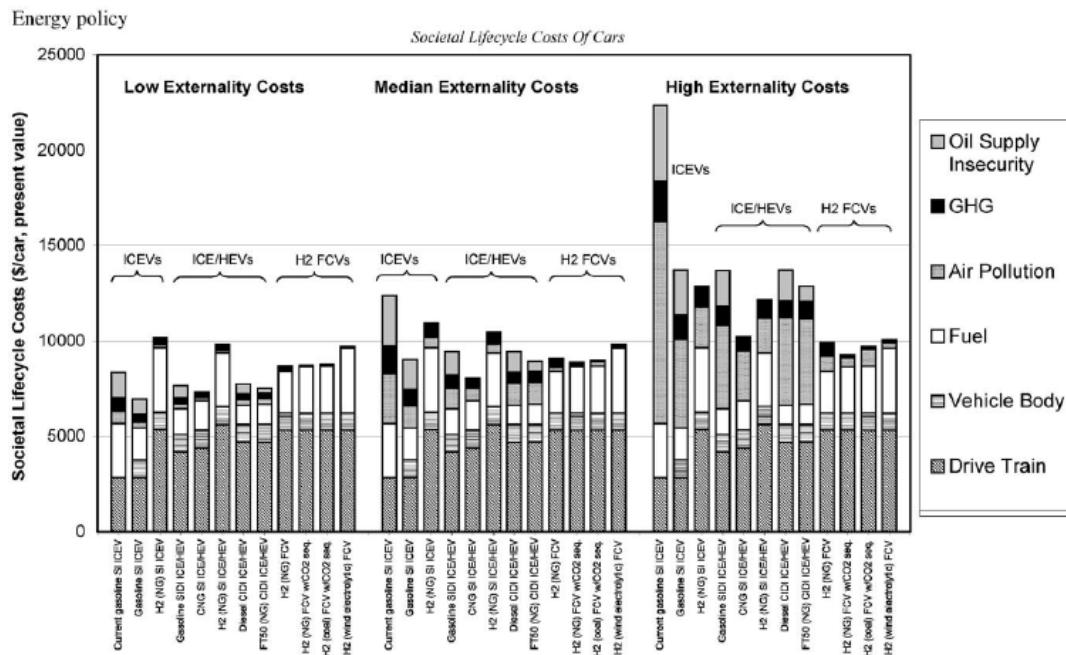


Fig.5. Costes sociales del ciclo de la vida con opciones alternativas de combustible/motor y costes externos bajos, medios y elevados. Fuente: Odgen et al. (2004).

**Colella WG, Jacobson MZ, Golden DM. Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. J. Power Sources 2005;150:150-81.**

**Jacobson MZ., Colella WG, Golden DM. Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. Science 2005;308;1901-5.**

Investigadores de la Universidad de Stanford examinaron el cambio potencial que experimentan las emisiones primarias al establecer la economía de hidrógeno que reemplaza la actual flota de vehículos de combustible fósil en EEUU por vehículos FCVs. Concluyen que la reducción total de costes de salud y medioambientales con la introducción de los FCVs puede ser 33-283 mil millones de \$ por año en EEUU para el caso del hidrógeno obtenido a partir de gas natural y de energía eólica.

Para el caso de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno, este estudio analizó las emisiones y el consumo de energía para tres formas de producir hidrógeno: reformado con vapor de gas natural, electrólisis alimentada con energía eólica y gasificación del carbón. Se concluye que la sustitución de unos vehículos por otros conllevaría una reducción significativa en emisión de contaminantes al aire debido a la eliminación de productos de la combustión en el motor de combustión interna y la reducción de las emisiones en el procesamiento del petróleo aguas arriba.

**Granovskii M., Dincer I., Rosen MA. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. J. Power Sources 2006; 159:1186-93.**

En este estudio Granovskii et al. utilizaron varios datos publicados para comparar los vehículos convencionales, híbridos, eléctricos y de pila de combustible desde las perspectivas económicas y medioambientales. La comparación se basa en un procedimiento matemático que incluye la normalización de los indicadores económicos (precio del vehículo y del combustible durante la vida del vehículo y la autonomía del vehículo) y los indicadores ambientales (gases efecto invernadero y emisiones de contaminación atmosférica) y evaluación de una relación óptima entre los distintos tipos de vehículos en una flota. La eficiencia económica y el impacto ambiental del uso de vehículos eléctricos dependen en gran medida de la fuente de la electricidad. Si la electricidad proviene de fuentes de energías renovables, el vehículo eléctrico tiene más ventajas que el vehículo híbrido. Si la electricidad proviene de combustibles fósiles, el vehículo eléctrico es competitivo en el caso de que la electricidad se genere a bordo. Y se obtiene que si la electricidad se genera con una eficiencia del 50-60% en un motor de turbina de gas conectado a una batería de alta capacidad y a un motor eléctrico, el vehículo eléctrico es más competitivo. Por lo tanto, concluyeron en este estudio que la generación de electricidad a bordo desde un sistema de pila de combustible mejoraría la clasificación económica y medioambiental de los vehículos eléctricos.

**Ajanovic A. On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. International Journal of Hydrogen Energy; 2008: 4223-34.**

En este estudio llevado a cabo en Austria, se concluye que los FCVs no serán una buena solución hasta el año 2030, asumiendo unos parámetros favorables para el desarrollo de la infraestructura del hidrógeno, el motivo de esto se atribuye a que el coste del hidrógeno y de los vehículos de pila de combustible es todavía muy elevado. Solamente después de unos desarrollos tecnológicos unidos a una reducción importante del coste de los vehículos de pila combustible

De este estudio se concluye que la mayor parte del coste del hidrógeno se debe a su producción, en algunos casos incluso más de un 95%. Estos costes dependen en gran medida del coste de la energía primaria que se ha utilizado para producir el hidrógeno. En Austria la forma menos económica de producir hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables, es la electrólisis con electricidad fotovoltaica. Los costes de inversión en fotovoltaica son unas seis veces mayores si se comparan con la energía eólica o dos veces mayor comparado con la energía hidráulica. La forma más barata de producir hidrógeno renovable es utilizando biomasa, **0,11 €/kWh**.

Aunque la producción actual de hidrógeno a partir de combustibles fósiles es menos cara, esta producción no está libre de emisiones. A medio plazo, la electrólisis in situ utilizando electricidad obtenida a partir de fuentes de energía renovables y el uso de hidrógeno gaseoso en las estaciones de repostaje podría ser interesante para aplicaciones concretas. Para una capacidad de producción baja de hidrógeno, por electrólisis, la producción in situ es económicamente la mejor solución, porque de esta manera se ahorra el coste del transporte de hidrógeno. Este estudio ha mostrado que el transporte de hidrógeno gaseoso con camiones es efectivo para distancias cortas y pequeñas cantidades de hidrógeno, pero no es competitivo con el transporte de hidrógeno líquido. El transporte por conductos es una solución para el caso del hidrógeno gaseoso pero supone una gran inversión en infraestructura. En este estudio se obtiene que el coste del hidrógeno está entre **0,09 €/kWh y 1,18 €/kWh**.

El mejor escenario para introducir los vehículos FCV's es la próxima década, seguida de un ligero aumento sobre el año 2040 (Fig.6).

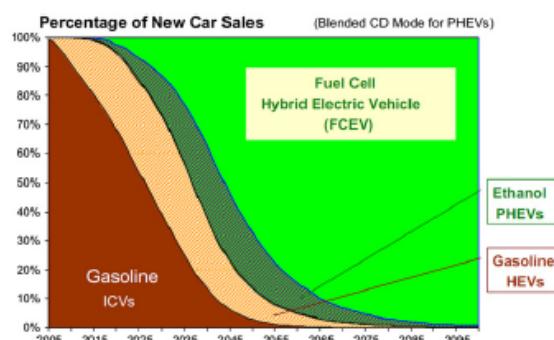


Fig.6. Proporción de ventas de vehículos de distintos tipos de vehículos.  
Fuente: Thomas CE (2), (2009).

Desde el punto de vista del constructor, el cambio a FCVs será caro. Debido a la naturaleza y madurez de la flota actual de vehículos de combustión interna, los FCVs no pueden entrar en la industria del transporte como modelos rudimentarios que pueden evolucionar lentamente a lo largo del tiempo. Aunque un pequeño número de FCVs se fabrican y se venden en EE.UU y Japón, hace falta una gran investigación y desarrollo para que puedan producirse en masa.

Los fabricantes ven la transición a los FCVs en unos 55 años planificada como sigue: diseño de un vehículo competitivo (15 años), penetración hasta un 35% de la producción del nuevo vehículo (25 años), y penetración hasta un 35% de las millas recorridas por una flota (20 años).

Se está empezando a investigar una posible relación simbiótica entre los FCVs y los vehículos eléctricos de batería.

**Greene DL, Leiby PN, James B., Perez J., Melendez M., Milbrant A., et al. Analysis of the transition to hydrogen fuel cell vehicles & the potential hydrogen energy infrastructure requirements. ORNL/TM-2008/30; March 2008.**

Greene *et al.* estimaron que los costes acumulados de políticas alternativas para una transición exitosa a los FCVs fueron de 10 a 45 mil millones de \$ para un período comprendido entre 2012 y 2025. Utilizando una curva de aprendizaje y el modelo de infraestructura UC Davis SSCHISM, el NRC (2008) presentó el análisis de varios escenarios de hidrógeno. Para el escenario de éxito del Hidrógeno, el estudio concluye que el punto de equilibrio de los FCVs con los vehículos de gasolina se producirá en el año 2023 y los costes de inversión en el año 2023 (diferencia en el precio de los vehículos más la diferencia del coste del combustible) para los FCVs alcanzarán unos costes competitivos (22 mil millones de \$).

**Lee JY, Yoo M, Cha K, Lim TW, Hur T. Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel. Int J Hydrogen Energy 2009; 34:4243-55.**

Lee *et al.* llevaron a cabo un análisis del coste del ciclo de la vida del hidrógeno que examina los costes del pozo al tanque (“well-to-tank”), los costes del tanque a la rueda (“tank-to-wheel”) y los costes externos de la emisión de gases y del efecto invernadero, e indican que los costes del ciclo de vida del hidrógeno dependen del precio del FCV, de la capacidad de producción, de la eficiencia del combustible, de los costes sociales y de la interacción del hidrógeno. Este estudio utiliza la metodología del cálculo del coste del ciclo de vida del hidrógeno para identificar cuando puede ser el hidrógeno económicamente viable en comparación con los combustibles convencionales y qué política energética es más eficaz para el fomento de la introducción del hidrógeno en el mercado competitivo del combustible. Las distintas formas de obtener hidrógeno, objeto de este estudio son: el H<sub>2</sub> obtenido mediante reformado de vapor de gas natural, H<sub>2</sub> obtenido mediante el reformado de vapor de

nafta, H<sub>2</sub> obtenido mediante el reformado de gas licuado del petróleo e H<sub>2</sub> producido a través de la electrólisis del agua. Además, en esta comparación también se han incluido los combustibles convencionales, gasolina y diesel. En este estudio se calcularon los costes del ciclo de vida de los combustibles objeto de estudio y se han examinado varios factores clave para identificar la viabilidad económica de los distintos sistemas, estos factores se detallan a continuación: precio del vehículo de pila de combustible, coste social de los gases de efecto invernadero, las emisiones del aire reguladas (CO, VOC, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas en suspensión), economía del combustible del vehículo de pila de combustible y costes capitales de los equipos de H<sub>2</sub> en las estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>. Los costes del ciclo de vida del hidrógeno dependen también de la capacidad de producción. Aunque en la actualidad, las distintas formas de H<sub>2</sub> producido son más eficientes que los combustibles convencionales en la etapa de utilización del combustible, tienen un aspecto que los hacen menos competitivos que el combustible convencional en los costes del ciclo de vida ("well-to-wheel") debido al elevado coste de los vehículos de pila de combustible.

En este estudio se modela un escenario futuro basado en la política energética de Corea y en los objetivos para el año 2015 de la OECD/IEA para predecir la penetración del hidrógeno en el mercado del combustible del transporte. En el año 2015 si el mercado del hidrógeno se ha extendió y las tecnologías necesarias se han desarrollado, se espera que los costes asociados se reduzcan debido a la producción en masa y al aumento de estaciones abastecedoras de H<sub>2</sub>. Además el análisis del escenario se lleva a cabo para diagnosticar los efectos que tienen unos factores clave sobre los costes del ciclo de vida, tales como el coste de los vehículos de pila de combustible, los costes sociales de las emisiones, y la eficiencia del combustible de los vehículos de pila de combustible.

En el escenario del año 2015, se espera que todas las formas de H<sub>2</sub> producido tengan unos costes del ciclo de vida inferiores a los combustibles convencionales. Es evidente que el precio de los vehículos de pila de combustible es el factor más importante para impulsar la economía del hidrógeno y de los vehículos de pila de combustible. A menos que el precio esté por debajo del precio de estos vehículos en EEUU, 62.320 \$, es necesario rebajarlo para impulsar este mercado. El incentivo o los impuestos por los gases de efecto invernadero o emisiones que contaminan el aire también se espera que estimule la difusión del H<sub>2</sub> y los vehículos de pila de combustible, especialmente para el caso del H<sub>2</sub> obtenido con energía eólica. La incertidumbre en la eficiencia del combustible de los vehículos de pila de combustible y los costes capitales de los equipos en las estaciones de repostaje tienen poca influencia en los costes del ciclo de vida del H<sub>2</sub>.

Este estudio integra los costes well-to-tank y los costes tank-to-wheel para 160.000 km recorridos por cada vehículo durante su ciclo de vida. En la etapa de eficiencia del combustible ("well-to-tank"), en la actualidad, solamente el H<sub>2</sub> obtenido a través de Nafta (producción centralizada) mostró unos costes de WTT inferiores a la gasolina mientras que el tipo de estación no es viable económicamente porque tiene elevados costes capitales y una baja eficiencia de producción. En la fase de utilización del combustible, los vehículos de pila de combustible de hidrógeno tienen una elevada

eficiencia energética. En la etapa “well-to-wheel”, análisis del pozo a la rueda en la que se tiene en cuenta la energía consumida en la fase de obtención de la materia prima, en su transformación en combustible, en la distribución y venta del mismo y por último en el uso final de la energía o el combustible en los vehículos, ninguna de las distintas formas de H<sub>2</sub> obtenido es competitivo frente a los distintos combustibles convencionales esto se debe al elevado precio de los vehículos de pila de combustible. Por lo que la investigación y el desarrollo son necesarios para reducir los costes de este tipo de vehículos y de los equipos necesarios. En 2015 se espera que el H<sub>2</sub> tenga viabilidad económica en comparación con los combustibles convencionales. El Hidrógeno obtenido a través del reformado de vapor de agua sería el más viable económicamente ya que se espera que el gas natural sea más barato que el petróleo y también porque emite menos contaminantes. Pero si se tiene en cuenta el coste social, el H<sub>2</sub> obtenido con energía eólica sería el mejor ya que emite menos gases de efecto invernadero y menos contaminantes del aire que otras vías de producción.

**Stephens-Romero S., Carreras-Sospedra M., Brouwer J., Dabdub D., Samuelsen S.** Determining air quality and greenhouse gas impacts of hydrogen infrastructures and fuel cell vehicles. *Environ Sci Technol* 2009; 43:9022-9.

Este estudio muestra que los FCVs de hidrógeno con una penetración de mercado del 75% en la costa sur Air Basin de California conducirán a una mejora sustancial en la calidad del aire en paralelo con la reducción del 61-68% de emisiones de gas invernadero.

**Thomas CE, (1). Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles, International Journal Hydrogen Energy 2009;34:9279-9296.**

**Thomas CE, (2). Fuel cell and battery electric vehicles compared. International Journal Hydrogen Energy 2009;34:6005-20.**

Estudios llevados a cabo por **Thomas CE. (1)(2)** comparan los beneficios sociales de varias alternativas de transporte (reducción en la contaminación atmosférica local, emisiones de efecto invernadero, y consumo de combustible). Concluyen que las únicas soluciones a la “cuasi-independencia” energética serían los vehículos de hidrógeno y los vehículos eléctricos, y los ahorros de costes sociales de los FCVs justifican los costes de la infraestructura del hidrógeno. Los FCVs son superiores a los vehículos eléctricos de ión Litio en la mayoría de los aspectos: pesan menos, cuestan menos, menor emisión de gases efecto invernadero, menos energía pozo-rueda (WTW) (con gas natural o biomasa) y menor tiempo de repostaje. Sin embargo, los vehículos eléctricos de batería tienen menor coste de combustible, utiliza menos energía WTW solar ó eólica por distancia recorrida (millas), y en los próximos años tendría un buen acceso a la capacidad de repostaje.

**Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy 2010;38:24-9.**

Igualmente, un estudio publicado más nuevo llevado a cabo por Offer et al. llegó a la conclusión de que tanto los vehículos eléctricos de batería como los vehículos híbridos de pila de combustible “enchufables” tendrán costes del ciclo de la vida inferiores que los vehículos de pila de combustible en 2030, los cuales tendrán un coste parecido a los de un vehículo convencional de gasolina.

La mayoría de los estudios se centran en la estimación del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero para las futuras opciones de vehículos en un determinado momento. Algunos estudios consideran los costes iniciales de los vehículos, los costes de funcionamiento, los costes externos, pero algunos consideran solamente el coste del vehículo y algunos incluyen solamente ciertos costes externos.

En la mayoría de los estudios no se modela explícitamente el rendimiento del vehículo, pero en pocos estudios, el rendimiento se simula con ADVISOR. Ninguno de los estudios utiliza un modelo de coste detallado para los componentes del vehículo para examinar los principales impulsores del coste; ninguno de ellos utiliza de manera combinada la energía y el modelo de coste del vehículo para asegurar la coherencia entre el coste y las estimaciones de rendimiento, y ninguno de ellos considera los costes de operación, seguro, y mantenimiento. Algunos estudios utilizan el modelo GREET para estimar la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Yongling Sun, Joan Ogden, Mark Delucchi. Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles. International Journal of hydrogen energy 35 (2010) 11932-11946.**

El estudio llevado a cabo por Yongling Sun et al. se basa en investigaciones previas e intenta cubrir o solucionar algunas deficiencias identificadas anteriormente. Los autores utilizan los modelos AVCEM (*Advanced Vehicle Cost and Energy-Use Model*), SSCHISM y otros modelos para estimar el coste social del ciclo de vida de los FCVs de hidrógeno y los vehículos convencionales de motores de combustión interna (ICEVs). El coste social del ciclo de vida se define como la suma del coste del vehículo, del coste del combustible y del coste de operación y mantenimiento. El rendimiento del vehículo, el uso de energía y todos los costes se modelan en detalle en AVCEM, lo que permite analizar la coherencia entre el rendimiento y la estimación de costes. AVCEM es un modelo de rendimiento de vehículo y de diseño que permite a los usuarios diseñar un vehículo que satisfaga el rendimiento y la especificación con la potencia y almacenamiento necesarios. Los costes externos se pueden estimar tanto utilizando el modelo AVCEM como el modelo de emisiones del ciclo de vida (LEM, *Lifecycle Emissions Model*). Se puede modelar la reducción de costes del sistema de pila de combustible con el tiempo a medida que el volumen de producción aumenta. Sistématicamente se puede estimar el daño material antes de la

contaminación atmosférica y proporcionar una estimación de los costes externos si se utiliza petróleo.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que los FCVs tendrían un mayor valor inicial que el vehículo de combustible convencional aún cuando su producción sea en masa. Para el caso de referencia utilizado, los costes externos de un FCV de hidrógeno pueden ser 800-900 \$, unos 2.000\$ menos en comparación con un vehículo de gasolina. El ahorro total de costes externos de un FCV puede ser alrededor de 9.700 \$. Los gastos necesarios para producir FCVs de hidrógeno competitivos con respecto a los vehículos de gasolina son bastante sensibles a las externalidades (efecto negativo o positivo de la producción o consumo de algunos agentes sobre la producción o consumo de otros, por los cuales no se realiza ningún pago o cobro) y al precio futuro de la gasolina.

**Department of Energy. United States of America. 2011 Fuel Technologies Market Report. July 2012.**

Según el informe llevado a cabo por el departamento de energía de US, los costes de pilas de combustible han disminuido de manera importante para el caso de vehículos ligeros, con una reducción de más del 80% desde el año 2002 y del 30% desde el año 2008, según el DOE. El contenido de Platino se ha reducido en un factor de cinco y en la actualidad contiene menos de 0,2 g/kW, siendo el objetivo de DOE de 0,125 g/kW. Por otro lado, la durabilidad de las pilas de combustible se ha duplicado.

Como se muestra en la Fig.7. el coste por kW de un sistema de pilas de combustible en el sector del transporte se redujo a menos de 50\$/kW por primera vez en el año 2011.

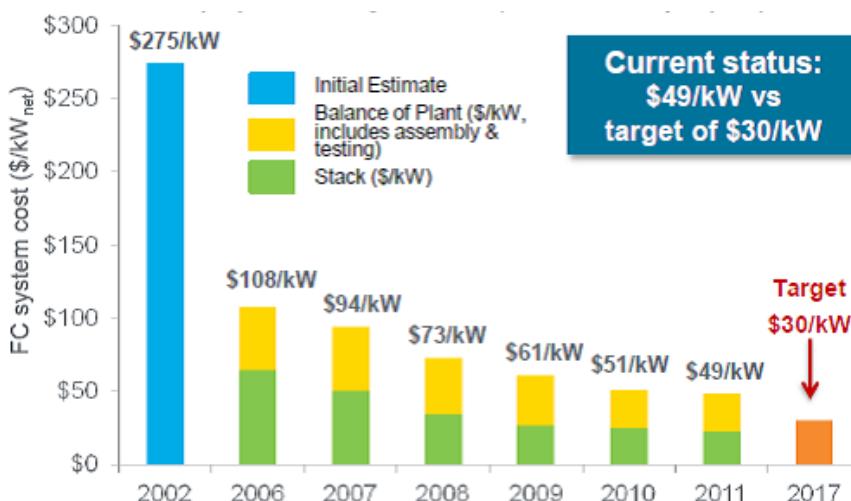


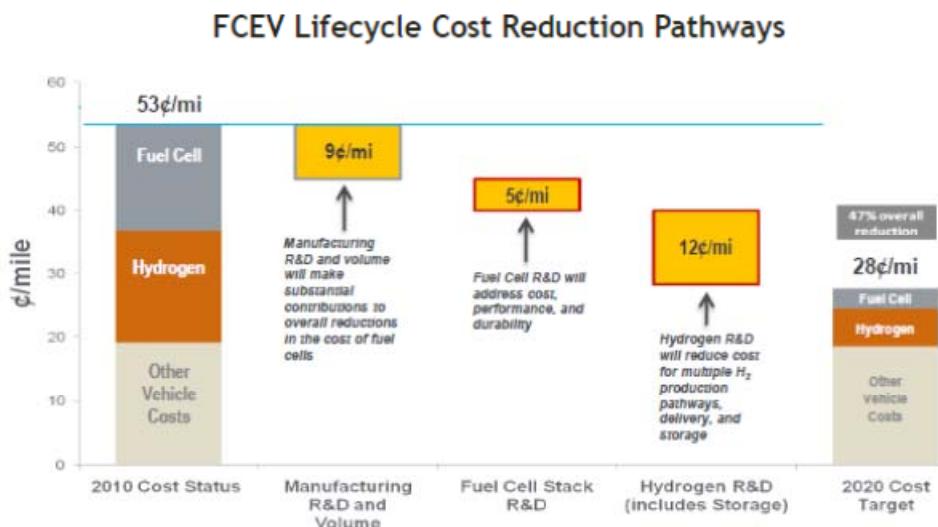
Fig.7. Coste del sistema de pila de combustible para el transporte por kW, asumiendo un elevado volumen de producción (500.000 unidades/año).

Fuente: Department of Energy. United States of America, (2012).

El coste para producir y distribuir hidrógeno también continúa disminuyendo. Para la producción distribuida, el coste de hidrógeno (distribuido y libre de impuestos) obtenido a partir de reformado de gas natural ya está por debajo de 4 \$por galón de gasolina

equivalente, dentro del objetivo establecido por el DOE: 2-4 \$ por galón de gasolina equivalente. El coste del hidrógeno (distribuido y libre de impuestos) obtenido a partir de electrólisis está en torno a 6 \$ por galón de gasolina equivalente (**Department of Energy. United States of America, 2012**).

Por otro lado, el DOE esta tratando de reducir los costes de ciclo de vida de los vehículos de pila de combustible a menos de la mitad, de 53 centavos de \$/milla en 2010 a 28 centavos de \$/milla en 2020 (*Fig.8*). Se espera esta reducción de costes aumentando el volumen de fabricación y las mejoras tecnológicas tanto en las pilas de combustible como en la producción y almacenamiento de hidrógeno.



*Fig.8. Formas de reducir el costo de los vehículos de pila de combustible.*  
Fuente: **Department of Energy. United States of America, (2012)**.

#### 2.4. Estado actual de los vehículos de pila de combustible.

La tecnología de las pilas de combustible ha progresado en cuanto a reducción de costes, vida y durabilidad del sistema. Sin embargo, el progreso en lo que se refiere a reducción de costes, tanto de las pilas de combustible como del hidrógeno, debe continuar, la disponibilidad de estaciones de abastecimiento de hidrógeno debe aumentar, en especial estaciones que proporcionen hidrógeno producido a partir de fuentes renovables. El rendimiento y durabilidad de las pilas en las aplicaciones del transporte también deben mejorarse. Por otro lado, la concienciación de la sociedad con respecto al hidrógeno y las pilas de combustible es baja, por lo que hace falta una mayor divulgación y educación en este campo. Y por último las normas de seguridad y de producción tienen que ser revisadas para reflejar la situación actual.

Casi todos los fabricantes de vehículos cuentan con programas de investigación y desarrollo para poner a punto la tecnología de las pilas de combustible. La viabilidad económica de estos vehículos está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora de los sistemas de almacenamiento del

hidrógeno en los vehículos y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.

Las pilas de combustible utilizadas en el transporte son PEMFC, como ya se ha indicado. En la mayoría de las aplicaciones, las pilas de combustible van con una batería o con otro dispositivo de almacenaje de energía. En esta configuración la pila de combustible es la que proporciona la potencia primaria o la potencia a la batería. La *Tabla 3* muestra las pilas de combustible disponibles en el mercado para el sector del transporte en el año 2011.

*Tabla 3. Pilas de combustible comercialmente disponibles para el transporte, año 2011. Fuente: Department of Energy. United States of America, (2012).*

Fabricante	Nombre del producto	Tipo	Potencia generada
<b>Ballard</b>	FCvelocity-HD6	PEM	75 y 150 kW
<b>Hydrogenics</b>	Hypm HD Modules	PEM	4,8,12,16,33 y 100 kW
<b>Nuvera</b>	Andromeda Fuel Cell Stack	PEM	100 kW
	HDL-82 Power Module	PEM	82 kW
<b>UTC Power</b>	PureMotion 120	PEM	120 kw

Los criterios que han de ser considerados a la hora de desarrollar las pilas de combustible son:

- Dinámica de la entrega de potencia (potencia total y ritmo de entrega de ésta).
- Tiempo para arrancar en frío.
- Vida útil.
- Rango de humedad y de temperatura operacional.
- Eficiencia total incluyendo los elementos auxiliares.
- Precio (euros por cada kilovatio de potencia).
- Peso (kilogramos por cada kilovatio de potencia).
- Área requerida para enfriar la pila de combustible ( $m^2$  necesarios).
- Comportamiento para aplicaciones no estacionarias (vibraciones, cambios de temperatura, etc.).
- Resistencia a impactos.

En la actualidad, no existe aún a nivel mundial un mercado consolidado del hidrógeno, y el desarrollo de vehículos con pila de combustible está limitado a prototipos.

España participa en distintos proyectos europeos de demostración relacionados con el hidrógeno.

Las perspectivas de futuro de los vehículos impulsados por hidrógeno se detallan a continuación:

- Hasta aproximadamente el año 2030 se espera que los combustibles fósiles, sobre todo combinados con técnicas de captura y el almacenamiento del carbono, sigan siendo la fuente dominante de energía para la producción del hidrógeno en Europa. Paulatinamente, y hasta dicho año, el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables irá penetrando en el mercado.

- La infraestructura de suministro del hidrógeno es probable que incluya tanto el aprovisionamiento de hidrógeno en grandes centrales de suministro, como su obtención local en los puntos de consumo.
- La introducción de los vehículos de pila de combustible en el mercado depende en gran medida de los éxitos que se consigan en la reducción de los costes del sistema de propulsión. En menor medida, el precio de la producción y del suministro, el coste de almacenamiento del hidrógeno, el precio del petróleo y la internalización de los costes ambientales también determinarán el ritmo de penetración del hidrógeno en el sistema europeo de energía.
- Todavía hay una gran incertidumbre sobre el ritmo de incorporación al mercado del hidrógeno, así como sobre las inversiones totales requeridas para la introducción de las tecnologías del hidrógeno.
- Para determinar el papel futuro del hidrógeno es importante desarrollar una visión final del sistema energético en cada país. Dicha visión ayudaría a diseñar incentivos sociopolíticos para la introducción del hidrógeno.

Uno de los factores claves en la introducción de los vehículos de pila de combustible es la producción del hidrógeno en la que hay que considerar los siguientes aspectos:

- El reformado y la electrólisis para la producción de hidrógeno constituyen procesos que ya están disponibles comercialmente y gracias a ello, pueden desempeñar un papel clave a la hora de satisfacer la demanda energética del hidrógeno a corto y medio plazo.
- El hidrógeno actualmente es más costoso que los combustibles convencionales, pero se espera que en el futuro se pueda producir en Europa con costes por kilómetro recorrido competitivos, en comparación con los costes de la gasolina y del diesel. La fiscalidad de cada combustible puede jugar un papel clave en la competitividad del hidrógeno frente a los combustibles convencionales. Los ahorros han de obtenerse tanto en la producción del hidrógeno y las pilas de combustible como en el almacenamiento del primero.
- La seguridad de suministro de la energía, el agotamiento de los recursos fósiles y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a medio y largo plazo impulsarán, en cualquier caso, la transición hacia tecnologías con emisiones CO<sub>2</sub> bajas o neutras. Esta transición se apoyará en el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables, incluyendo la biomasa.
- A largo plazo, a medida que se desarrolle estas tecnologías, se deberán evaluar continuamente parámetros tales como el impacto de las curvas de aprendizaje de la tecnología, los beneficios económicos de la producción en masa y, de manera cada vez más importante, el análisis del ciclo de vida completo de todo el sistema. Los Estados miembros de la Unión Europea y la Comisión Europea tendrán un papel importante a la hora de estimular la I+D de las tecnologías del futuro. El desarrollo de posturas comunes respecto a las políticas de introducción en el mercado de las tecnologías ya maduras será igualmente otro aspecto clave en este contexto.

- En el período de transición se deberán considerar medidas políticas que mejoren la viabilidad económica de la producción del hidrógeno (a partir de tecnologías con emisiones de CO<sub>2</sub> bajas o neutras).

Japón y EE.UU. son los que más están trabajando en el desarrollo de la tecnología de las pilas de combustible, seguido de Europa. Los países emergentes como China y Corea, están poniéndose al día rápidamente. Japón es el líder mundial del despliegue de las pilas de combustible.

En cuanto al mercado español del vehículo de pila de combustible, Madrid y Barcelona, junto a otras ocho ciudades europeas (Amsterdam, Estocolmo, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Stuttgart, Reykjavik y Oporto), fueron pioneras en el año 2003 en la utilización de autobuses urbanos equipados con pilas de combustible (proyecto "Clean Urban Transport for Europe" - **CUTE**, financiado por la UE y liderado por la empresa Daimler-Chrysler (Mercedes)). El proyecto CUTE contemplaba la demostración en estas 10 ciudades europeas de 30 autobuses propulsados por pila de combustible. Los 30 autobuses estaban equipados con pilas Ballard de 205 kW de potencia con tecnología de membrana de intercambio protónico (también conocida por su nombre en inglés Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC).

Por otro lado, la ciudad de Madrid inició en el año 2003 su participación en el proyecto **CITYCELL** liderado por Iveco-Irisbus. El proyecto contemplaba la demostración de cuatro autobuses propulsados por pila de combustible en cuatro ciudades europeas: Madrid, París, Turín y Berlín. En el caso de Madrid y Turín, los vehículos empleados eran autobuses Iveco dotados de pila de combustible UTC de 62 kW con tecnología de membrana de intercambio protónico (PEMFC). A mediados de 2003 únicamente quedaba en funcionamiento el autobús de Madrid compartiendo la estación de abastecimiento de hidrógeno con los autobuses del proyecto CUTE.

Los dos proyectos anteriores ya han finalizado. Más reciente es el proyecto europeo **HYCHAIN MINI-TRANS**, que desplegó varias flotas de vehículos accionados mediante pilas de combustible en cuatro países europeos: Francia, España, Alemania e Italia. El objetivo principal de este proyecto es movilizar el volumen suficiente de vehículos (por encima de los 158 vehículos) como para obtener en términos industriales reducciones de costes.

El proyecto **H2 moves Scandinavia** se trata del primer proyecto europeo sobre hidrógeno financiado por el programa conjunto sobre pilas de combustible e hidrógeno (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) lanzado por la Comisión Europea y los grupos interesados en el sector europeo. Se utilizaran 15 vehículos FCEV en Oslo y Copenhague y la infraestructura de repostaje de hidrógeno necesaria. Dicho proyecto comenzó en el año 2010.

El proyecto **CHIC** (Clean Hydrogen in European Cities) es el paso para la comercialización de autobuses de pila de combustible. Este proyecto se ha llevado a cabo con 26 autobuses por zona urbana y con rutas en cinco lugares de Europa.

Por otra parte, dentro de la Estrategia E4 de Ahorro y Eficiencia Energética en España y de los consiguientes Planes de Acción, se vienen contemplando desde el año 2006 ayudas en la renovación de vehículos.

Para el ejercicio 2008, la adquisición de un automóvil o vehículo industrial con MMA hasta 3.500 kg se subvenciona con un 15% del valor de mercado, hasta un máximo de 6.000 €. A partir de 3.500 kg, la subvención es del 15% del total del coste de adquisición hasta un máximo de 50.000 €. Además, las estaciones de carga son objeto de una ayuda de entre 30.000 hasta 60.000 euros según sean individuales o colectivas. Como ya se ha comentado, dichas ayudas son gestionadas por las diferentes CC.AA. a través de convenios de colaboración suscritos con IDAE. Estas subvenciones son compatibles con otras ofertas de fabricantes o vendedores de vehículos.

También, a nivel nacional, existe una deducción fiscal por adquisición de vehículos ecológicos (cumpliendo normas medioambientales más estrictas que la reglamentación vigente), del 9% del valor total de la inversión en el año fiscal correspondiente a la misma.

La investigación y la industria vinculada al hidrógeno como sector energético está liderada por Estados Unidos, Alemania, Canadá y Japón. En Europa, Alemania lidera el desarrollo tecnológico del hidrógeno. El gobierno alemán y las empresas han constituido la **Clean Energy Partnership (CEP)**, el mayor proyecto europeo de desarrollo de infraestructuras del hidrógeno y pila de combustible.

Según objetivos de la UE, el punto de partida en el horizonte temporal de la implantación de las tecnologías del hidrógeno es 2015 y se espera alcanzar que el 5% de los vehículos comercializados en 2020 usen esta tecnología. En 2050 el uso del hidrógeno y las pilas de combustible estaría ampliamente difundido.

En España, en los últimos cinco años se ha producido un importante impulso, promovido por la AeH2 y la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y las Pilas de Combustible (PTEHPC), con más de un centenar de proyectos estatales e inversiones de más de 300 millones de euros. Entidades españolas han participado en más de 30 proyectos europeos, con una inversión de 10 millones de euros.

En España hay grandes oportunidades para ocupar posiciones de ventaja en la carrera del hidrógeno, como el disponer de la mayor planta del mundo de uso limpio de carbón por Gasificación Integrada en Ciclo Combinado, que, unida a las tecnologías de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, podría situar a España en una situación de ventaja en el conocimiento de la tecnología de producción centralizada de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con cero emisiones; o la Plataforma Solar de Almería, un referente mundial en la investigación y desarrollo de energía solar y sus tecnologías relacionadas.

Otros puntos fuertes de España para el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno son el alto nivel de las ingenierías españolas en integración de sistemas, electrónica y

balance de planta; la buena posición de España en el sector de las tecnologías renovables para su aplicación combinada con el hidrógeno y la disponibilidad de una sólida y amplia red de transporte y distribución energética (gas natural) que facilitaría la transición al hidrógeno.

Para la AeH2, los principales requisitos para que España mejore su competitividad en la carrera del hidrógeno, son favorecer la implantación de centros de producción de hidrógeno tanto centralizados como distribuidos, basados en gran parte en producción a través de energías renovables; dotar una red suficiente de suministro de hidrógeno que cubra la circulación por toda la península y, finalmente, la consolidación de empresas especializadas con personal cualificado.

El impulso de estas infraestructuras requiere la estrecha colaboración y apoyo entre las administraciones públicas y las empresas.

Los vehículos de pila de combustible aún no se encuentran a la venta, aunque sí es posible alquilarlos. En cualquier caso siguen sin estar al alcance de todos los posibles usuarios interesados en esta tecnología.

Según se indica en el informe del departamento de energía de los Estados Unidos (**Department of Energy. United States of America, (2012)**) los fabricantes de automóviles siguen mejorando y probando los vehículos de pila de combustible. Por ejemplo, General Motors (GM) entregó 16 vehículos Equinox de pila de combustible a los militares de EE.UU. como parte de la iniciativa de hidrógeno Hawaï (H2I). Bajo esta iniciativa, GM y otros 11 socios están tratando de hacer que los vehículos de pila de combustible impulsados por hidrógeno y su infraestructura de abastecimiento sea una realidad en Hawaï en el año 2015.

Toyota entregó dos de sus vehículos FCHV-adv a la ciudad de Hempstead, Nueva York, y anunció que iba a colocar más de 100 de estos vehículos en universidades, compañías privadas y agencias del gobierno tanto en California como en Nueva York en los tres años siguientes. Estos vehículos también se desplegaron con la ayuda de la compañía All Nippon Airways y el servicio de Taxi Welcome-Home Limousine en el aeropuerto de Narita en Tokio. Dichos vehículos se utilizaban para transportar a los pasajeros que regresan a Japón desde Europa y los EE.UU.

En enero de 2011, Mercedes Benz llevó a sus vehículos de la clase B Fuel Cell a una prueba de 125 días a través de cuatro continentes, 14 países y en una amplia gama de climas y condiciones de conducción.

Hyundai probó 50 de sus Tucson ix en 2011 en Corea del Sur y anunció planes para comenzar la producción masiva en el año 2015.

Honda se unió al CEP (Clean Energy Partnership) y proporcionó dos FCX Clarity para llevar a cabo el proyecto.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Ajanovic A. On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. International Journal of Hydrogen Energy; 2008; 4223-34.

Borup Rod, Meyers Jeremy, Pivovar Bryan, Seung Kim Yu, Mukundan Rangachary, Garland Nancy, et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation. Chem. Rev. 2007; 107:3904-51.

Cai Mei, Ruthkosky Martin S, Belabbes Merzougui, Swathy Swathirajan, Balogh Michael P, Oh Se H. Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts. Journal of Power Sources 160; 2006:977-986.

Colella WG., Jacobson MZ., Golden DM. Switching to a US hydrogen fuel cell vehicle fleet: the resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. Journal of Power Sources; 2005:150-81.

Department of Energy. United States of America. Hydrogen and fuel cell activities, progress, and plans. Report to Congress. January 2009.

Department of Energy. United States of America, 2011. [http://www.autonomie.net/publications/fuel\\_economy\\_report.html](http://www.autonomie.net/publications/fuel_economy_report.html)

Department of Energy. United States of America. 2011 Fuel Technologies Market Report. July 2012.

Eaves S., Eaves J. A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. J Power Sources 2004;130:208-12.

Granovskii M., Dincer I., Rosen MA. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. J. Power Sources 2006; 159:1186-93.

Greene DL, Leiby PN, James B., Perez J., Melendez M., Milbrant A., et al. Analysis of the transition to hydrogen fuel cell vehicles & the potential hydrogen energy infrastructure requirements. ORNL/TM-2008/30; March 2008.

Guvelioglu Galip H., Stenger Harvey G. Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources; 2005:95-106.

Hiramitsu Y., Mitsuzawa N., Okada K., Hori M. Effects of ionomer content and oxygen permeation of the catalyst layer on proton exchange membrane fuel cell cold start-up. Journal of Power Sources; 2010:1038-45.

Jacobson MZ., Colella WG, Golden DM. Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. Science 2005;308;1901-5.

Jiao Kui, Li Xianguo. Cold start analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:5077-94.

Jinfeng Wu, Xiao Zi Yuan, Martin Jonathan J, Haijiang Wang, Jiujun Zhang, Jun Shen, et al. A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources* 2008; 184:104-19.

Lee JY, Yoo M, Cha K, Lim TW, Hur T. Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34:4243-55.

Maranzana Gael, Moyne Christian, Dillet Jerome, Didierjean Sophie, Olivier Lottin. About internal currents during start-up in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*; 2010;195(18):5990-5.

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis.The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy* 2010;38:24-9.

Ogden JM, William RH, Larson ED. Societal lifecycle cost comparison of cars with alternative fuels/engines. *Energy Policy* 2004;32:7-27.

Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. Experimental and theoretical investigations on a proton Exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures. *Journal of Power Sources*; 2009:80-8.

Stephens-Romero S., Carreras-Sospedra M., Brouwer J., Dabdub D., Samuelsen S. Determining air quality and greenhouse gas impacts of hydrogen infrastructures and fuel cell vehicles. *Environ Sci Technol* 2009; 43:9022-9.

Thomas CE, (1). Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles, *International Journal Hydrogen Energy* 2009;34:9279-9296.

Thomas CE, (2). Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal Hydrogen Energy* 2009;34:6005-20.

Veziroglu Ayfer, Macario Rosario. Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011).

Wang MQ. GREET 1.5 e Transportation Fuel-Cycle Model:Volume 1: Methodology, Development, Use, and Results. Report ANL/ESD-39 from Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory for Office of Transportation Technologies, US Department of Energy, August 1999.

Wu Jinfeng, Zi Yuan Xiao, Martin Jonathan J, Wang Haijiang, Zhang Jiujun, Jun, Shen, Wu Shaohong, Merida Walter. A review of PEM fuel cell durability; degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources* 2008; 184:104-19.

Wu Jinfeng, Martin Jonathan J, Orfino Francesco P, Wang Haijang, Legzdins Colleen, Yuan Xiao-Zi, Sun Colin. In situ accelerated degradation of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell: part I: effect of elevated temperature and flow rate. Journal of Power Sources; 2010: 1888-94.

Yongiling Sun, Joan Ogden, Mark Delucchi. Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles. International Journal of hydrogen energy 35 (2010) 11932-11946.

Zhili Miao, Hogmei Yu, Wei Song, Lixing Hao, Zhigang Shao, Qiang Shen, et al. Characteristics of proton exchange membrane fuel cells cold start with silica in cathode catalyst layers. International Journal of Hydrogen Energy; 2010:1-6.

**ANEXO III. FACTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN  
UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.**

**ANEXO III. FACTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.**

<b>3.1. Propiedades del Hidrógeno .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2. Eficiencia de los sistemas basados en pilas de combustible e hidrógeno. ....</b>	<b>8</b>
<b>3.3. Consumo de energía y emisiones de los sistemas basados en pilas de combustible e hidrógeno.....</b>	<b>10</b>
<b>3.4. Reducción de la dependencia de combustibles fósiles .....</b>	<b>16</b>
<b>3.5. Seguridad del Hidrógeno .....</b>	<b>16</b>
<b>3.6. Costes del Hidrógeno.....</b>	<b>19</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>29</b>

### ANEXO III. FACTORES TÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN UN VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE.

En esta tarea se han analizado aquellos factores técnicos importantes del H<sub>2</sub> a tener en cuenta frente a la utilización de otros combustibles.

Una vez analizado el estado del arte sobre este tipo de vehículos se han definido aquellos parámetros relevantes a tener en cuenta para comparar la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos que utilizan H<sub>2</sub> como combustible frente a vehículos alimentados por otro tipo de combustible.

Hay que tener en cuenta que el parque móvil en 10 años pasará de 775 millones de vehículos a 1.100 millones circulando por nuestro planeta (lo que supone un incremento del 2,4 % de demanda de energía primaria hasta el 2020) (Fig. 1)

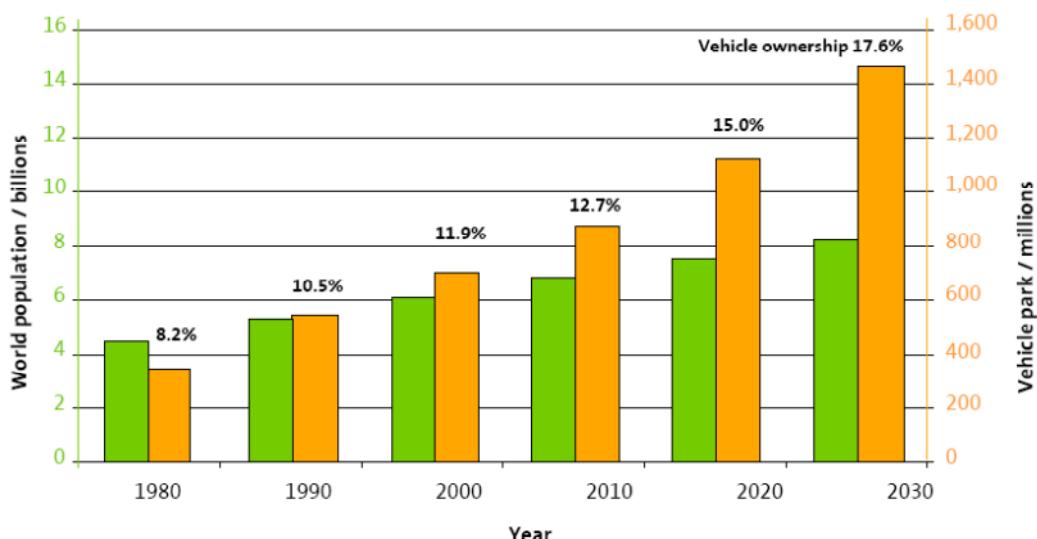


Fig. 1. Crecimiento previsto del parque vehicular mundial hasta 2030.

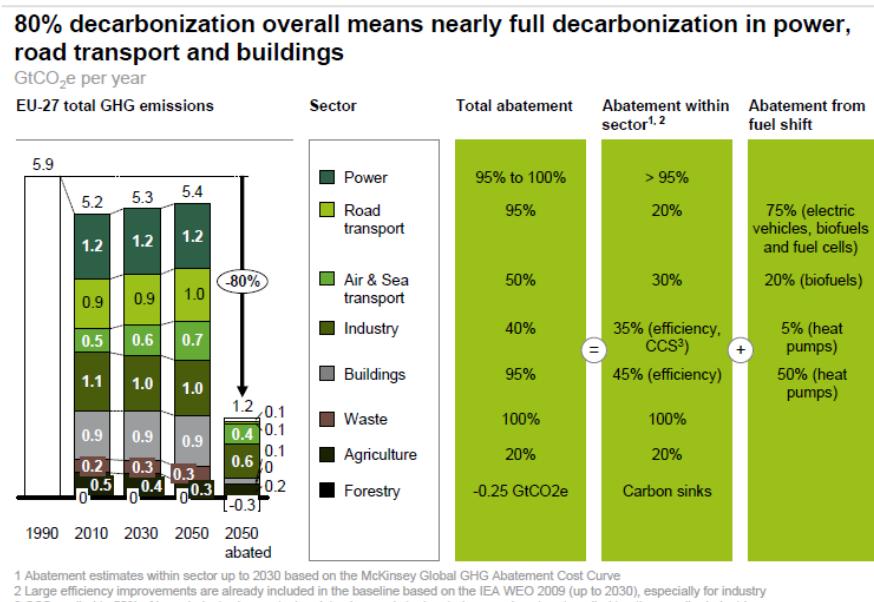
Fuente: L.B. Systemtechnik, 2005.

El sector del transporte por carretera es uno de los que más contamina en términos de emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea (UE), con el objeto de reducir las emisiones de este sector el Reglamento (CE) 443/2009 (*por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de los turismos nuevos como parte del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos ligeros*) fija unos límites relativos a los turismos nuevos. (130 g de CO<sub>2</sub>/km, a partir del año 2020 dicho nivel se reducirá a 95 g de CO<sub>2</sub>/km. A partir del año 2012, si los fabricantes superan las emisiones específicas establecidas, deberán pagar una prima suplementaria. (European Commission, 2013 (1)).

La UE tiene como objetivo reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero hasta el año 2050. En el marco del Protocolo de Kioto, los 15 países que eran miembros de la UE antes de 2004 (UE15) se comprometieron a reducir sus emisiones colectivas un 8% por debajo de los niveles de 1990 durante los años 2008-2012. La mayoría de Estados miembros que han ingresado en la UE desde 2004 también tienen objetivos de reducción de emisiones de entre un 6 y un 8%.

Para el 2020, la UE se ha comprometido a reducir sus emisiones un 20% por debajo de los niveles de 1990. La UE se ha ofrecido a aumentar esta reducción a un 30% si otros grandes países emisores en el mundo desarrollado y en desarrollo también se comprometen a reducir las emisiones globales.

Para el año 2050, los líderes de la UE han respaldado el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa en un 80-95% en comparación con los niveles de 1990 (**European Commission, 2013 (2)**). Pero esta descarbonización podría requerir el 95% de la descarbonización del sector del transporte por carretera (**ROADMAP 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, 2010**). Se ha planteado el cambio del combustible convencional por la electrificación, la biomasa y/o el hidrógeno para que sea viable para el año 2050 en todos los sectores de demanda energética: transporte, industria y edificación. En la *Figura 2.* se muestra una combinación convincente de la reducción de los niveles en todos los sectores que alcanza el objetivo previsto del 80% de reducción de emisiones establecido en la UE-27.



*Fig.2. Combinación de reducción de niveles de CO<sub>2</sub> en todos los sectores..*

Fuente: **ROADMAP 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, 2010.**

Otro objetivo de la UE es que el consumo de energía renovables (tales como eólica, solar y biomasa) alcance un 20% en el año 2020 (**European Commission, 2013 (2)**).

Los vehículos eléctricos (de batería (BEVs), de pila de combustible (FCEVs) y los híbridos enchufables (PHEVs)) son necesarios para alcanzar la reducción global de CO<sub>2</sub> establecida por la UE.

A largo plazo, la introducción del hidrógeno para utilizarse en las pilas de combustible como nuevo vector energético. Lo que permitirá producir hidrógeno a partir de agua, con electricidad y calor de fuentes renovables, siendo sus emisiones nulas. Si la fuente de la que se obtiene el hidrógeno es el gas natural o el carbón, entonces es necesaria

la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para reducir emisiones, pero en el caso de los vehículos de pila de combustible alimentada con hidrógeno las emisiones locales se reducirán ya que el único efluente es vapor de agua.

Los vehículos de pila de combustible (FCVs) tienen la propiedad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases que contribuyen al cambio climático. Deben producirse varios cambios antes de que estos vehículos sean competitivos con los vehículos convencionales pero los beneficios potenciales de esta tecnología son sustanciales.

A continuación se muestra un análisis DAFO sobre el uso del Hidrógeno como combustible (*Tabla 1*):

*Tabla 1. Análisis DAFO sobre el uso del hidrógeno como combustible. Fuente: IDAE, FITSA (2008).*

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se trata de una fuente de energía sino de un vector energético, y como tal hay que consumir cierta energía para fabricarlo.</li> <li>- Su transporte es costoso por tener una baja densidad energética por unidad de volumen y por ser un gas muy volátil.</li> <li>- No existe en la actualidad una infraestructura de suministro de hidrógeno para su uso como vector energético comercial.</li> <li>- El almacenamiento en el vehículo de la cantidad de hidrógeno suficiente para asegurar una autonomía media no está resuelto.</li> <li>- Las pilas de combustible están en fase de desarrollo.</li> <li>- En la actualidad se produce en el mundo una veinteava parte de todo el hidrógeno que sería necesario para sustituir a los combustibles alternativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Que el precio del hidrógeno no llegue a ser competitivo con los combustibles alternativos.</li> <li>- El precio del hidrógeno puede ser muy dependiente del precio del gas natural o de la electricidad renovable.</li> <li>- La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (especialmente el carbón) necesita del desarrollo de nuevas técnicas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero.</li> <li>- Un aumento del precio del platino usado como catalizador de la combinación química del hidrógeno con el oxígeno encarecería considerablemente las pilas de combustible.</li> <li>- Inexistencia de una normativa sobre su uso.</li> </ul>
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se puede producir hidrógeno a partir de múltiples fuentes, incluidas fuentes energéticas sostenibles y locales.</li> <li>- El hidrógeno se puede almacenar, pudiendo servir como método de almacenamiento de la energía de fuentes alternativas, las cuales son muy estacionales o cíclicas con el tiempo.</li> <li>- El uso de hidrógeno en pilas de combustible puede aumentar el rendimiento global del sistema, al no estar limitado a ciclos termodinámicos.</li> <li>- El uso del H<sub>2</sub> no produce CO<sub>2</sub>, ni contaminantes del aire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la dependencia energética.</li> <li>- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.</li> <li>- Desarrollo de un sistema optimizado de producción y distribución de H<sub>2</sub>.</li> </ul>

Los vehículos de pila de combustible por fuera son idénticos a los convencionales, pero contienen en su interior componentes tecnológicamente avanzados, la diferencia más obvia es la pila de células de combustible que convierte el hidrógeno almacenado a bordo con oxígeno del aire en electricidad para hacer funcionar el motor eléctrico que propulsa al vehículo. Los componentes más importantes de un FCV convencional se muestran en la Fig.3:

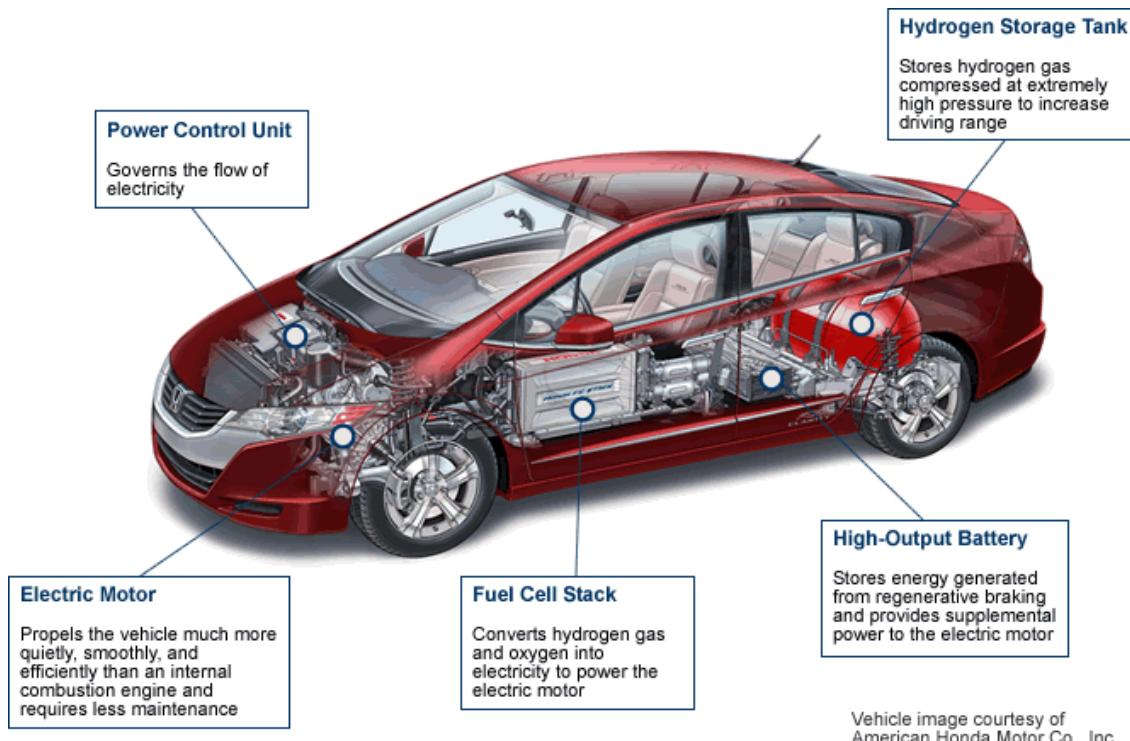


Fig.3. Componentes de un vehículo de pila de combustible.

Fuente: U.S. Department of Energy, 2013 (1).

### 3.1. Propiedades del Hidrógeno

El Hidrógeno es el elemento más abundante del universo pero no es un recurso natural sino un vector energético, hay que producirlo con el aporte energía. Puede producirse a partir de varios recursos (agua, recursos fósiles, biomasa,...) siguiendo para ello diversos procesos de transformación (electrólisis, gasificación, reformado...). Todos estos procesos de transformación suponen un gasto energético cuyos costes son asumibles (al igual que ocurre con la electricidad) pero a diferencia de la electricidad el hidrógeno es almacenable.

Es el elemento más ligero (14,5 veces más que el aire) y abundante del universo. En la Tabla 2. se muestran las principales propiedades del Hidrógeno.

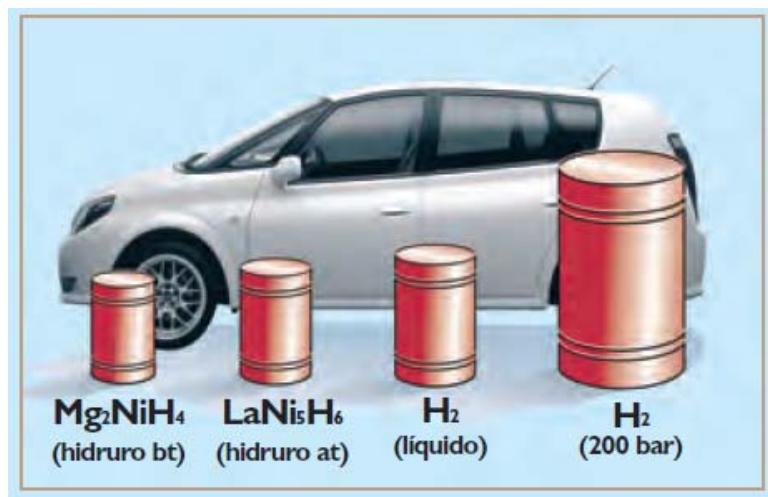
Tabla 2. Propiedades del Hidrógeno. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).

Densidad	0,0899 kg/Nm <sup>3</sup> (gas) 0,0708 kg/l (líquido)
Poder calorífico Inferior PCI	120 MJ/kg
Poder calorífico superior PCS	141,86 MJ/kg
Límites de explosión	4-75% (concentración de H <sub>2</sub> en aire)
Límites de detonación	18,3 - 59,0 % (concentración de H <sub>2</sub> en aire)
Capacidad calorífica específica	C <sub>p</sub> = 14,199 KJ/(kg K) C <sub>v</sub> = 10,074 KJ/(kg K)
Coeficiente de difusión	0,61 cm <sup>2</sup> /s

Puede extrañar que un kilo de hidrógeno genere la misma energía que 2,78 kg de gasolina (Tabla 3), sin embargo, ese kilo de hidrógeno ocupa mucho volumen por lo que la cantidad de energía que aporta por unidad de volumen (su densidad energética) es muy baja.

El hidrógeno es el más ligero de los gases, tiene una densidad de energía baja y debe ser o bien comprimido a muy altas presiones o licuado a muy bajas temperaturas para ser almacenado en un volumen razonable. Técnicamente los más fácil es comprimirlo a 200-350 bares pero sigue ocupando muchísimo (a una presión de 200 bares, almacenar 4 kg requeriría un depósito de 250 litros (Fig.4)), pero el uso de nuevos materiales (composites de fibras de carbono con polímeros o aluminio) permite almacenarlo a presiones de hasta 700 bares.

Si el Hidrógeno está en estado líquido, ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita mucho frío para alcanzar los 253 °C bajo cero que necesita el hidrógeno para pasara a estado líquido. Por lo que se investiga en distintos métodos que permitan almacenar el hidrógeno y que ocupe menos, las dos alternativas existentes hasta la fecha son el almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos y en nanotubos de carbono. De momento algunas marcas han optado por incorporar un reformador que convierte en hidrógeno otro combustible que ocupa menos volumen (metanol o gasolina).

Fig.4. Volumen que ocupan 4 kg de H<sub>2</sub>. Fuente: Asensio Paloma, "Hidrógeno y Pila de combustible".

A continuación, en la *Tabla 3* se muestra una comparativa del hidrógeno con otros combustibles, calculando el valor energético basado en el PCI.

*Tabla 3. Comparativa del Hidrógeno con otros combustibles. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).*

H <sub>2</sub>	Gasolina	Gasóleo	Metano	Gas Natural	Propano	Butano	Metano I
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,40 kg	2,54-3,14 kg <sup>1</sup>	2,59 kg	2,62 kg	6,09 kg
1 litro H <sub>2</sub> líquido	0,268 l	0,236 l					0,431 l
1 litro H <sub>2</sub> (350 bar)	0,0965 l	0,0850 l	0,240 l (350 bar)	0,3-0,35 l (350 bar)	0,117 l (350 bar)	0,127 l (350 bar)	0,191 l

<sup>1</sup> Dependiendo de la composición del Gas Natural.

La cantidad de H<sub>2</sub> a presión contenido en un volumen V determinado se calcula con la siguiente fórmula:

$$P \cdot V = z \cdot n \cdot R \cdot T$$

Siendo:

P: Presión en Pa

n: número de moles

V: Volumen en m<sup>3</sup>

R: constante 8,31 J/mol\*K

z: factor de compresibilidad

T: Temperatura en K

Por lo que es necesario conocer el factor de compresibilidad, en la *Tabla 4* se puede observar el factor de compresibilidad del Hidrógeno en función de la presión.

*Tabla 4. Factor de compresión del Hidrógeno. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).*

Presión (bar)	1	50	100	150	200	250	300
Factor de compresión	1	1,032	1,065	1,089	1,132	1,166	1,201

Presión (bar)	350	400	500	600	700	800	900
Factor de compresión	1,236	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632

En la *Tabla 5* se recoge la equivalencia del hidrógeno en energía.

Tabla 5. Equivalencia: Hidrógeno-Energía. Fuente: Asociación española del Hidrógeno, 2013 (1).

Masa H <sub>2</sub> (kg)	H <sub>2</sub> gas (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> líquido <sup>1</sup> (litros)	Energía <sup>2</sup> (MJ)	Energía <sup>2</sup> (kW*h)
1	11,12	14,12	120	33,33
0,0899	1	1,270	10,8	3,00
0,0708	0,788	1	8,495	2,359
0,00833	0,0926	0,1177	1	0,278
0,0300	0,333	0,424	3,6	1

<sup>1</sup>El Hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de 20,39 K.<sup>2</sup>Basado en el PCI.

En la Tabla 6 se presenta una comparación entre las propiedades físicas y químicas del hidrógeno y de otros combustibles como son el metano, el propano y la gasolina.

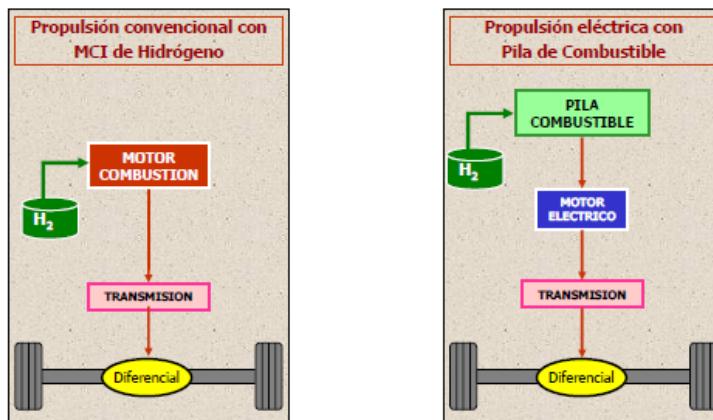
El hidrógeno es un buen combustible capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que otro combustible: 33,3 kWh/kg, frente a los 13,9 kWh/kg del gas natural o los 12,4 kWh/kg del petróleo (**Asensio Paloma, "Hidrógeno y Pila de combustible"**).

Tabla 6. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno, metano, propano y gasolina. Fuente: Gutiérrez Jodra, Luis , 2005.

Propiedad	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	Metano (CH <sub>4</sub> )	Propano (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	Gasolina -CH <sub>2</sub> -
Poder calorífico (MJ/kg)	120	50	46,3	44,5
Temperatura de autoignición (°C)	585	540	487	228-501
Temperatura adiabática de la llama en aire (°C)	2.045	1.875	1.925	2.197
Límites de ingnición en aire (% en vol.)	4-75	5,3-15	2,1-10	1,0-7,6
Propagación de la llama en aire (m/s)	2,65	0,4	-	0,4
Coeficiente de difusión en aire (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,18	-	0,05
Toxicidad	no	no	-	Alta a conc> 500 ppm
ΔV en la reacción con oxígeno	negativo	positivo		positivo

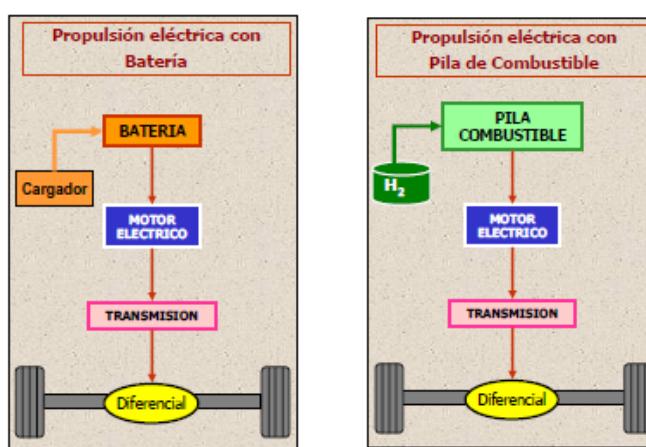
### 3.2. Eficiencia de los sistemas basados en pilas de combustible e hidrógeno.

El Hidrógeno en los vehículos puede utilizarse en motores de combustión interna (MCI) formando parte de una cadena de tracción convencional, o con pilas de combustible para configuraciones de tracción eléctrica (*Fig.5*).



*Fig.5. Distintos sistemas de propulsión utilizando Hidrógeno como combustible. Fuente: González García-Conde A. (2011).*

Los sistemas de propulsión basados en pila de combustible e Hidrógeno tienen varias configuraciones: la configuración “full power” en la que la pila de combustible esta dimensionada para suministrar toda la potencia necesaria para mover el vehículo (*Fig.6*) o la configuración “base load” en la que la pila de combustible esta dimensionada para suministrar la potencia base que requiere el vehículo, mientras que los picos de potencia los suministra un dispositivo de almacenamiento como puede ser una batería o un supercondensador (*Fig.7*).



*Fig.6. Vehículo eléctrico de pila de combustible con configuración “full power” comparado con un vehículo de batería. Fuente: González García-Conde A. (2011).*

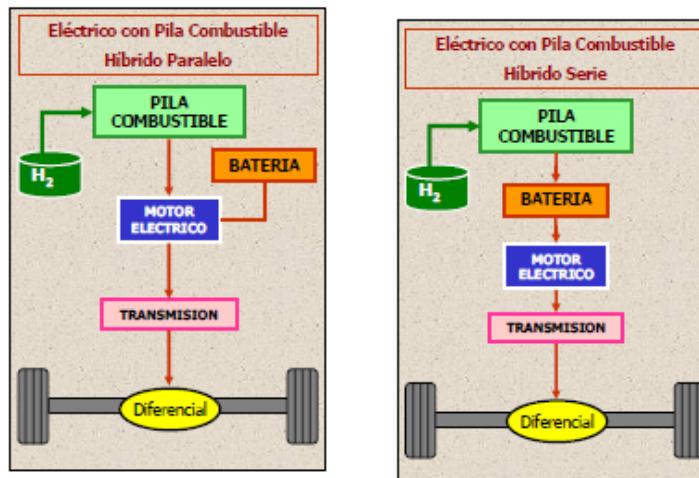


Fig.7. Vehículo eléctrico híbrido (utiliza pila de combustible y batería o supercondensador) con configuración “base load”. Fuente: González García-Conde A. (2011).

En el caso del vehículo eléctrico híbrido, como puede verse en la Fig.7 puede estar en paralelo, entonces la pila de combustible suministra la potencia de crucero y la batería (o supercondensador) la potencia pico, o en serie, en este caso la pila de combustible solamente recarga la batería y ésta suministra toda la potencia al motor eléctrico.

Un motor de combustión estacionario puede alcanzar eficiencias del 42%, un buen motor de coche puede rondar el 25%, ya que en un ciclo de conducción normal la mayor parte del tiempo el motor trabaja a cargas parciales, estando muy lejos de alcanzar su máxima eficiencia. Mientras que una pila de combustible utilizando hidrógeno, alcanza ya eficiencias del 60% (**Asociación española del Hidrógeno, 2013 (2)**). Una comparativa de eficiencias puede observarse en la Fig. 8.

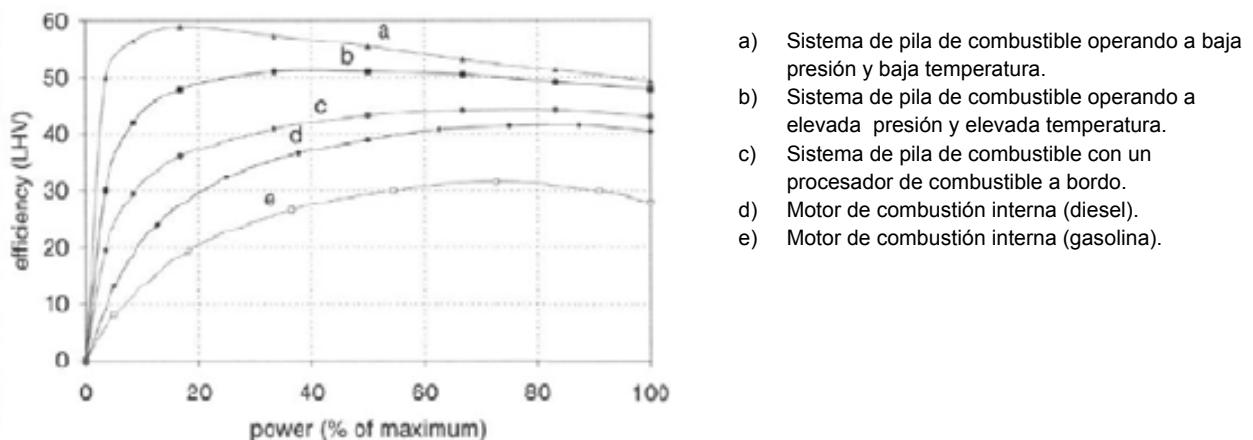


Fig.8. Comparación de eficiencia de pilas de combustible y de motores de combustión interna. Fuente: Frano Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice.

### 3.3. Consumo de energía y emisiones de los sistemas basados en pilas de combustible e hidrógeno.

Para poder evaluar las distintas opciones de sistemas de propulsión y de futuros combustibles es necesario llevar a cabo un análisis completo del ciclo de vida del combustible, comúnmente llamado análisis del “pozo a las ruedas” ( *Well-to-Wheels* ). En este análisis se utilizan el consumo de energía y las emisiones asociadas con la producción del combustible (o análisis del pozo al tanque (“*Well-to-Tank*”)), es decir, el consumo de energía y las emisiones asociadas para tener el combustible en el depósito del vehículo, y el consumo de energía y emisiones asociados al funcionamiento del vehículo (o análisis del tanque a la rueda ( “*Tank-to-Wheel*” ) . En la Fig.9 se muestra el ciclo de vida de la gasolina y del hidrógeno como combustible de un vehículo.



Fig.9. Ciclo de vida del combustible. Fuente: González García-Conde A. (2010).

EUCAR (European Council for Automotive R&D), CONCAWE (Oil companies' European association for environment, health and safety in refining and distribution) y JRC (Joint Research Centre of the European Commission) han actualizado su evaluación conjunta del “pozo a la rueda” del uso de la energía y de la emisión de gases de efecto invernadero para una amplia gama de combustibles futuros y para distintas opciones de tren de potencia (**Edwars R. et al., 2011**). Esta evaluación se llevo a cabo por primera vez en diciembre de 2003. Los objetivos de este estudio fueron:

- Establecer una evaluación conjunta y objetiva del uso de la energía y de la emisión de gases para una amplia gama de combustibles de automoción y de sistemas de propulsión existentes en Europa en el año 2010 y que habrá en años futuros.
- Considerar la viabilidad de cada tipo de combustible y estimar los costes macroeconómicos asociados.
- Que los resultados obtenidos sean referencia para todos los sectores interesados.

Las principales conclusiones que se obtuvieron fueron que un análisis “del pozo a la rueda” es la base esencial para evaluar el impacto de futuros combustibles y de distintas opciones de sistemas de propulsión. Tanto la eficiencia de la técnica de producción del combustible como la eficiencia del sistema de propulsión son clave para calcular el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La producción a gran escala de combustibles sintéticos o de hidrógeno a partir de carbón o gas reducen de manera considerable las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub>.

Los biocombustibles avanzados y el hidrógeno tienen un gran potencial para sustituir los combustibles fósiles. Los principales obstáculos que obtienen estas técnicas para aplicarlas a gran escala son los elevados costes y las complejidades asociadas a la recogida del material, el tamaño de la planta y la eficiencia.

En lo que se refiere a los combustibles y vehículos convencionales, los avances en distintas tecnologías permiten mejorar la eficiencia energética y la reducción de los gases de efecto invernadero, y se prevé unas mejoras más elevadas en la tecnología de los motores de gasolina y de gas natural comprimido (PISI) que en la tecnología de los motores diesel. La hibridación de la tecnología de los motores convencionales podría generar mejoras en cuanto al consumo de energía y a la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo las tecnologías híbridas aumentan la complejidad y el coste de los vehículos.

En cuanto al hidrógeno, este estudio (**Edwars R. et al., 2011**) obtiene como conclusiones que existen muchas vías de producir hidrógeno y los resultados dependen de la vía elegida.

Si el hidrógeno es producido a partir de gas natural, la reducción de emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero se consiguen si el hidrógeno se utiliza en vehículos de pila de combustible. El consumo de energía y las emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero son más elevadas para el caso de los vehículos de motor de combustión interna que utilizan hidrógeno como combustible que para el caso de los vehículos convencionales y de gas natural.

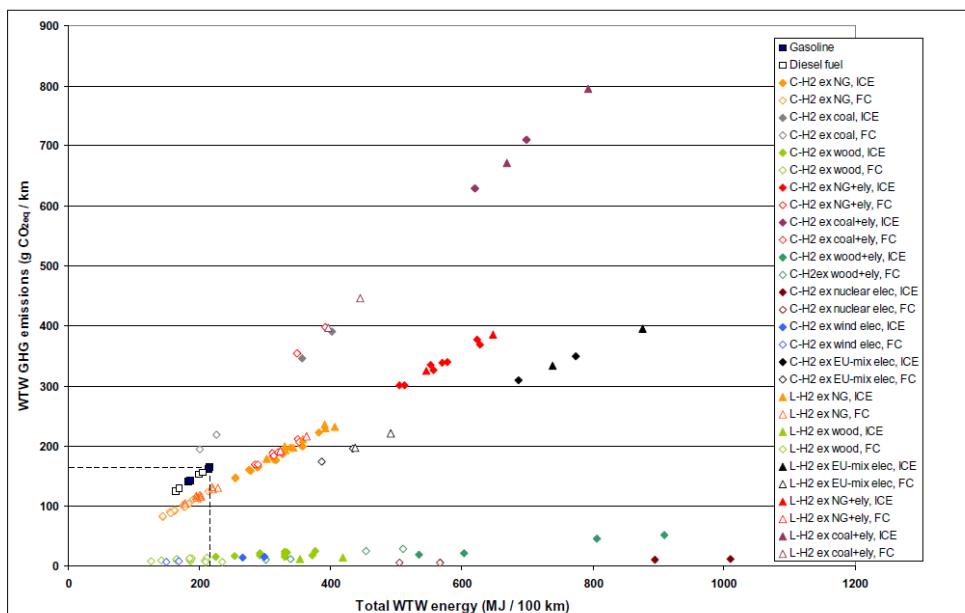
A corto plazo, el gas natural es la única fuente viable de obtener hidrógeno a gran escala. La reducción de emisiones “WTW” de gases de efecto invernadero solamente se conseguirá si se utiliza hidrógeno en vehículos de pila de combustible aunque con costes muy elevados. Los vehículos de motor de combustión interna de hidrógeno estarán disponibles en un corto plazo a menor coste que los vehículos de pila de combustible. Su uso aumentará las emisiones de gases de efecto invernadero, siempre y cuando el hidrógeno se produzca a partir de gas natural.

La electrólisis tiene mayor emisión de gases de efecto invernadero que la producción de hidrógeno a partir de gas natural. Mientras que la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables (biomasa, eólica y nuclear) genera bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado los reformadores a bordo ofrecen la oportunidad de establecer la tecnología de los vehículos de pila de combustible con la infraestructura de distribución de combustible que existe en la actualidad.

Considerando el hidrógeno como combustible, prácticamente todas las emisiones de gases de efecto invernadero se producen en la parte “WTT”, por lo que es interesante la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

En el estudio que nos ocupa se consideró una amplia variedad de vías para obtener hidrógeno, en la *Fig. 10* se muestra los requerimientos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero para vehículos del 2010 y futuros modelos.



*Fig. 10. Consumo de energía y emisiones WTW de gases de efecto invernadero para distintas vías de obtener hidrógeno (vehículos del 2010+).* Fuente: **Edwards R. et al. (2011)**.

Se observa que desde el punto de vista del consumo de energía y de la reducción de gases de efecto invernadero, hay formas de producir hidrógeno más favorables y otras que no son tan favorables. La reducción de gases de efecto invernadero se consigue a costa del consumo de una energía extra aunque la elevada eficiencia de las pilas de combustible puede compensar la elevada energía necesaria para producir hidrógeno. Las formas de obtener hidrógeno basadas en la electrólisis necesitan mucha energía, reflejando la baja eficiencia de producir electricidad comparada con la extracción química del hidrógeno.

Hay por lo tanto una gran diferencia entre los motores de combustión interna y las pilas de combustible en lo que se refiere al consumo de energía y a la emisión de gases de efecto invernadero.

Las siguientes figuras que muestran el consumo de energía WTW y las emisiones WTW de gases invernadero combinan: la energía gastada WTT (excluyendo la energía que contiene el combustible) por energía contenida en el combustible con la energía consumida TTW por el vehículo por unidad de distancia cubierta (ciclo NEDC).

En la Fig. 11 se compara el análisis WTW de un motor de combustión de hidrógeno y de un vehículo FCV, para el caso del hidrógeno producido a partir del gas natural, para un vehículo/combustible convencional y para el caso de vehículos de gas natural comprimido.

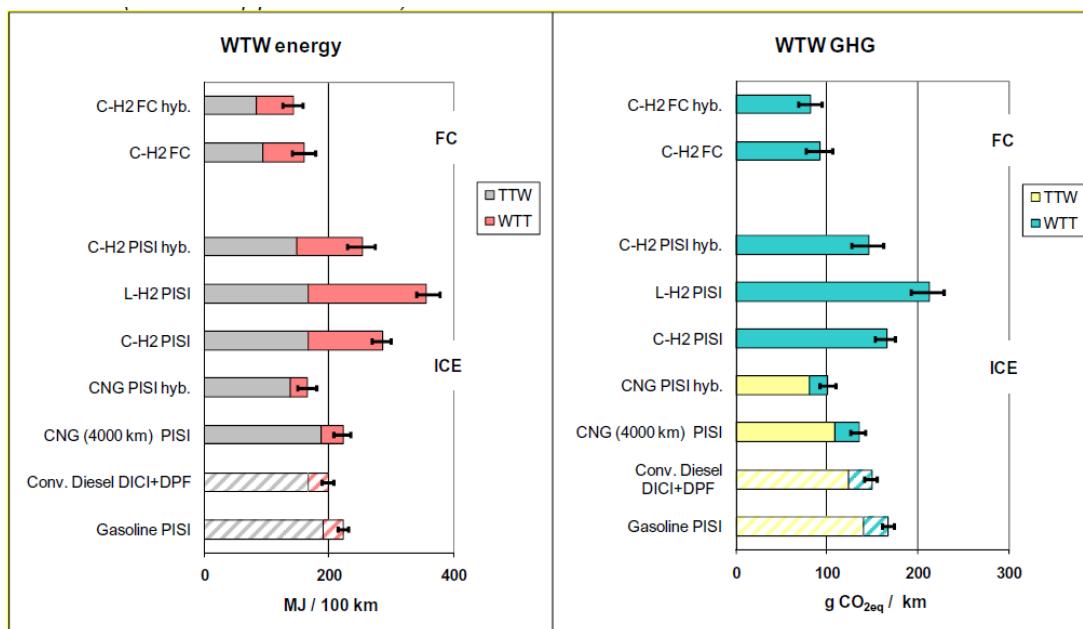


Fig. 11. Consumo total de energía y emisiones WTW de gases de efecto invernadero (GHG), para el caso de vehículos de hidrógeno obtenido a partir de gas natural, para el caso de vehículos convencionales y para el caso de vehículos de gas natural comprimido. Fuente: Edwards R. et al. (2011).

(Fuente de gas natural: 4000 km de tubería)

PISI: Port Injection Spark Ignition  
DICl: Direct Injection Compression Ignition  
DPF: Filtro de partículas

C-H<sub>2</sub>: Hidrógeno comprimido  
L-H<sub>2</sub>: Hidrógeno líquido

Las pilas de combustible ofrecen una clara reducción del consumo energía con respecto a los motores de combustión interna, que hoy en día, son menos eficientes.

Aunque los motores de combustión interna de hidrógeno tienen una buena economía del hidrógeno, su balance WTW con respecto al uso directo del gas natural como gas natural comprimido es desfavorable. El aumento del coste del vehículo es moderado y estos vehículos pueden competir con los vehículos bi-fuel (gasolina-hidrógeno).

Para el caso de los vehículos de combustión interna, el uso directo de gas natural comprimido es más eficiente energéticamente que el uso del hidrógeno.

Si el hidrógeno es producido a partir de gas natural, la reducción de las emisiones WTW de gases de efecto invernadero solamente se consigue con los vehículos de pila de combustible.

En este estudio se llevó a cabo el análisis WTW para el caso de una combinación de reformado de un hidrocarburo y de una pila de combustible (Fig. 12) y se observó que es menos favorable que el uso de hidrógeno obtenido a partir de gas natural combinado con una pila de combustible, la principal razón es la baja eficiencia de los reformadores a bordo debido a su reducido tamaño.

Si se compara con el caso de tener gasolina como combustible, la opción del reformador a bordo sería ligeramente mejor que el motor de combustión interna. Por lo que el estudio concluye que la producción de hidrógeno a bordo consume más energía y produce mayor emisión de gases de efecto invernadero que la producción de hidrógeno estacionaria.

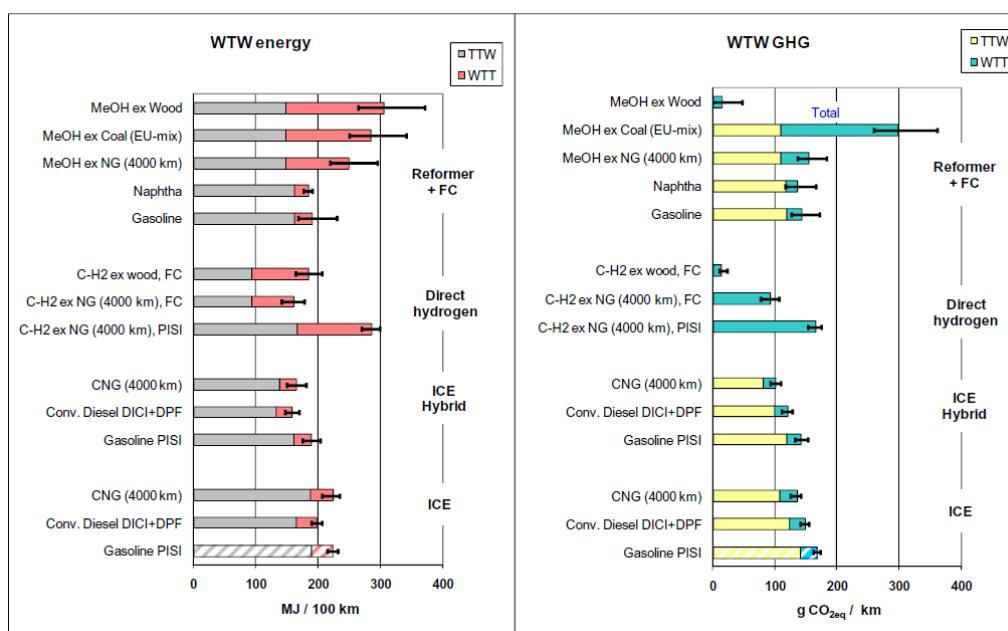


Fig. 12. Consumo total de energía y emisiones WTW de gases de efecto invernadero (GHG), para el caso hidrógeno obtenido de forma indirecta (vehículos 2010+). Fuente: Edwards R. et al. (2011).

Los vehículos de gasolina o diesel emiten gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, que contribuye al cambio climático global.

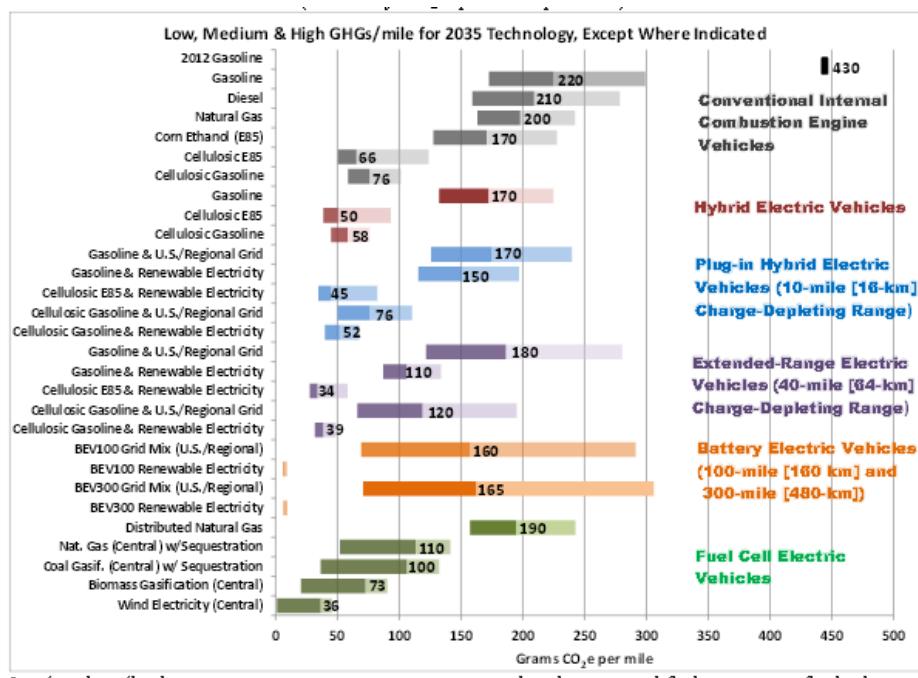
Los vehículos de pila de combustible que utilizan hidrógeno puro tienen cero emisiones en la fuente. Algunas pilas de combustible estacionarias utilizan gas natural o hidrocarburos para obtener el hidrógeno, pero incluso en estos casos se produce unas emisiones inferiores que las plantas eléctricas convencionales.

Los vehículos eléctricos de pila de combustible FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) son los que menos contaminan de todos los tipos de vehículos que consumen combustible directamente, tienen emisiones cero.

Los vehículos de pila de combustible (FCVs) que utilizan hidrógeno obtenido a partir de gas natural son de 2 a 3 veces más eficientes que los vehículos convencionales de gasolina, diesel o gas natural. Además los FCVs emiten 60% menos gases de efecto invernadero que los vehículos convencionales, y el 35% menos de gases de efecto invernadero que los vehículos de gas natural (**California Fuel Cell Partnership, 2009**).

El DOE (U.S. Department of Energy) compara las emisiones de gases de efecto invernadero WTW (Fig.13) y el consumo de petróleo (Fig.14) en 2035, teniendo en cuenta un incremento de eficiencia y el uso de unas vías de producción limpias, incluyendo el aumento de uso de fuentes renovables y la captura de carbono. Los FCVs que utilizan hidrógeno obtenido a partir de la biomasa emitirán un 83% menos de gases de efecto invernadero que los vehículos actuales de gasolina (2012 Gasoline) y consumirán un 98% menos de petróleo (**DOE, U.S. Department of Energy, 2013**).

Este WTW análisis incluye solamente el ciclo del combustible, es decir, no incluye el ciclo de vida de la fabricación del vehículo ni de la construcción/desmantelamiento de la infraestructura necesaria.



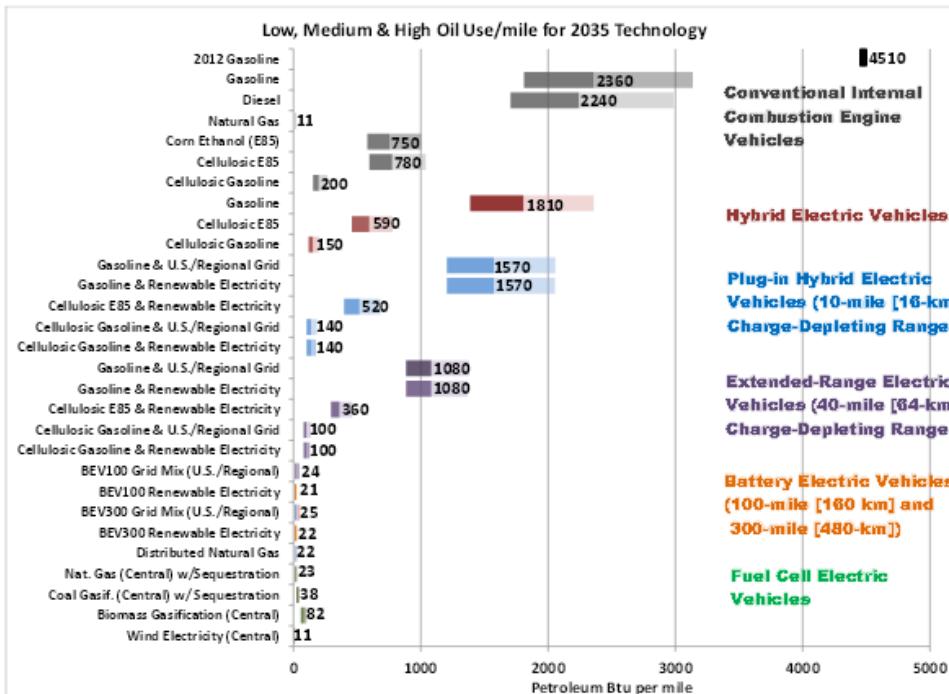
Low/medium/high: sensitivity to uncertainties associated with projected fuel economy of vehicles and selected attributes of fuels pathways, e.g., electricity credit for biofuels, electric generation mix, etc.

Notes:

- For a projected state of technologies in 2035.
- Renewable electricity includes biomass, hydro, wind, solar, and geothermal

<sup>1</sup> For comparison, the result for a 2012 mid-size car is also shown in the figure.

Fig.13. Emisiones WTW de gases de efecto invernadero (gramos de CO<sub>2</sub> equivalente por milla) para vehículos de segmento medio en el año 2035. Fuente: (**DOE, U.S. Department of Energy, 2013**).



BTU (Unidad de energía inglesa, British Thermal Unit)= 1.055,056 Julios

Fig.14. Consumo de petróleo WTW (BTUs por milla) para vehículos de segmento medio en el año 2035.

Fuente: (DOE, U.S. Department of Energy, 2013).

### 3.4. Reducción de la dependencia de combustibles fósiles

La Comisión Europea en su Libro Blanco del Transporte (**White Paper, 2011**) estableció el objetivo de desarrollar un sistema de transporte competitivo y eficiente que permita eliminar las emisiones de carbono y reducir la dependencia de los combustibles importados. El cambio hacia vehículos energéticamente eficientes y que utilicen sistemas de propulsión alternativos permitirá conseguir varios de los objetivos de la Unión Europea: reducir de emisiones y mejorar la calidad del aire, eliminar la emisión de CO<sub>2</sub> y prevenir el cambio climático, mantener seguridad energética e incrementar el uso de energías renovables.

### 3.5. Seguridad del Hidrógeno

Es un aspecto a tener en cuenta para un futuro uso masivo del hidrógeno, para ello deben tenerse en cuenta las propiedades del hidrógeno que aparecen en la *Tabla 7*. Es clave tener en cuenta su masa molecular que es la más baja de los elementos gaseosos, lo que da idea de su difusividad y de su baja densidad. Otras propiedades importantes son la temperatura de ignición y la toxicidad.

La velocidad de propagación de la llama favorece una posible explosión, mientras que la difusividad y la densidad tienen a reducir dicha probabilidad, especialmente en espacios abiertos.

En la *Tabla 7* aparece un grupo de propiedades del Hidrógeno relacionadas con la seguridad de su manejo y de su empleo como son su elevado coeficiente de difusión en el aire, los límites de detonación e inflamabilidad y las temperaturas de ignición de la llama.

*Tabla 7. Propiedades del hidrógeno y seguridad de su empleo. Fuente: Gutiérrez Jodra, Luis , 2005.*

<b>Coeficiente de difusión en el aire (T y P normales), cm<sup>2</sup>/segundo</b>	0,61
<b>Límites de inflamabilidad en el aire, % volumen</b>	4,0- 75,0
<b>Límites de detonación en el aire, % volumen</b>	18,3-59,0
<b>Límites de inflamabilidad en oxígeno, % volumen</b>	4,5-94,0
<b>Límites de detonación en oxígeno, % volumen</b>	15,0-90,0
<b>Temperatura de ignición en el aire, °C</b>	585
<b>Temperatura de ignición en el oxígeno, °C</b>	560
<b>Temperatura de la llama en el aire, °C</b>	2045
<b>Calor de combustión KJ/mol (1KJ/mol=1/4,184 kcal/mol)</b>	285,8

Por lo tanto, el hidrógeno es menos peligroso que otros combustibles porque cuando se quema su llama radia poco calor y en su combustión los productos no son venenosos como los de la gasolina o el gas natural, porque el producto es vapor de agua.

Algunos riesgos asociados al uso del hidrógeno son:

- El problema de tener escapes a través de huecos o uniones de líneas de transporte, más fácilmente que la gasolina o el gas natural, por su baja densidad. Por ello el hidrógeno líquido es más seguro que el gas debido a la baja presión de almacenamiento que no favorece las fugas.
- El peligro de explosión es importante porque es más sensible a la transición de la deflagración a la detonación que los hidrocarburos.

Algunas de las medidas de prevención que deberían tomarse son:

- Las zonas donde vaya a haber hidrógeno deben estar bien ventiladas y evitar zonas de acumulación en la parte superior.
- Instalar sistemas de detección, alarmas y protección contra fuegos y tener un plan de emergencia.
- Cumplir las normativas (que están en elaboración a nivel internacional).

Por lo tanto el hidrógeno requiere unas técnicas de manejo adecuadas a sus propiedades. Existen múltiples normas, como las americanas que recopila el HCSCC (Hydrogen Codes & Standards Coordinating Committee) y también existen unas regulaciones como la ISO TC 197 referente al hidrógeno y la IEC TC 105 sobre pilas de combustible (ambas en proceso de elaboración) y la iniciativa europea EIH.

También está el Reglamento (UE) 630/2012 de la Comisión, de 12 de julio de 2012, por el que se modifica el Reglamento 692/2008 en lo que respecta a los requisitos de homologación de tipo de los vehículos de motor alimentados con hidrógeno o con una mezcla de hidrógeno y gas natural por lo que se refiere a emisiones, y en lo que respecta a la inclusión de información específica relativa a los vehículos equipados con una cadena de tracción eléctrica en la ficha de características a efectos de la homologación de tipo CE.

Los vehículos de pila de combustible tienen unos ensayos específicos en lo que respecta a la evaluación de la protección que ofrecen a los ocupantes en caso de colisión (*Fig. 15*) y en los que respecta a un posible incendio (*Fig. 16*).

Crashworthiness Evaluation		
Test Item	Simulation	Vehicle Test
Sled Impact Test		 Before: He gas, 30bar No Leak Check the deformation of H <sub>2</sub> storage and delivery system
Side Impact Test (FMVSS 305)		 Before: He gas, 10bar No Leak Check the deformation of H <sub>2</sub> storage and delivery system. Check the H <sub>2</sub> tank burst pressure.
Rear Crash Test (FMVSS 301)		 Before: He gas, 30bar After: He gas, 350bar No Leak in the H <sub>2</sub> storage and delivery system

*Fig. 15. Ensayo para evaluar la protección que ofrece un vehículo de pila de combustible a sus ocupantes.*  
Fuente: (**Asociación española del Hidrógeno, 2013 (2)**).

Fire Test		
	Gasoline Vehicle	FCV with Type 3 Tank
Test Condition	• Fire initiated from the ashtray	
Result	• Fuel tank exploded after 40 minute.	• PRD activated after 22 minutes.
Vehicle		
	CNG Tank (150bar)	Hydrogen Tank (350bar)
Test Condition	• Fire Source: LPG gas	
Result	• PRD activated : CNG vent • max. flame height 11m	• PRD activated : H <sub>2</sub> vent • max. flame height 8m
Vehicle		

*Fig. 16. Ensayo para evaluar el comportamiento de un vehículo de pila de combustible en caso de incendio.* Fuente: (**Asociación española del Hidrógeno, 2013 (2)**).

### 3.6. Costes del Hidrógeno

Producir Hidrógeno en una planta centralizada no es caro, pero debido a sus características, baja densidad energética por unidad de volumen, los costes de almacenamiento y transporte si que son elevados. En los comienzos de la introducción del Hidrógeno hay que asumir que los sistemas de producción serán de tipo distribuido ya que la demanda no será elevada. En la *Tabla 8* se muestran las eficiencias y costes medios de las distintas técnicas de producir H<sub>2</sub>.

Se observa que uno de los procesos más baratos para producir H<sub>2</sub> y que menos contamina es la producción mediante la gasificación de biomasa.

*Tabla 8. Eficiencias y costes medios de distintas técnicas de producir H<sub>2</sub>. Fuente: González A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*

PROCESO	EFICIENCIA (%)	DISPONIBILIDAD	CENTRALIZADA/DESCENTRALIZADA	EMISIONES CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> / kWh H <sub>2</sub> )	PRECIO (€/kWh H <sub>2</sub> )
Gas Natural (SMR sin CCS)	70-75	Ya disponible	Ambas	288-292	0.07-0.1
Gas Natural (SMR con CCS)	60	Medio plazo	Centralizada	42.7	0.09-0.15
Gasificación Carbón (sin CCS)	50-60	Ya disponible	Centralizada	659	0.07
Gasificación Carbón (con CCS)	40-50	Medio plazo	Centralizada	20.3	0.08
Gasificación Biomasa	56	Medio Plazo	Descentralizada (cerca del recurso)	0	0.07-0.08
Electrólisis (con Eólica)	65-70	Corto plazo	Ambas	0	0.11-0.15
Electrólisis (con Red Eléctrica)	30	Ya disponible	Descentralizada	440	0.2
Ciclos Termoquímicos (Energía Solar)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.18
Ciclos Termoquímicos (Energía Nuclear)	38	Largo Plazo	Centralizada	0	0.06

Según un estudio llevado a cabo por **Thomas CE (3) (2003)**, el coste del hidrógeno producido localmente a partir de gas natural mediante reformadores de metano in-situ es menor que el coste de producir hidrógeno en una planta y tener que distribuirlo con camiones cisterna o trailers de tubos (tube trailers). Los costes del hidrógeno se muestran en la siguiente figura para tres opciones diferentes:

- Producción in-situ.
- Hidrógeno líquido transportado con camiones.
- Hidrógeno comprimido transportado con trailers de tubos.

Todos los costes incluyen los gastos variables teniendo en cuenta la compresión a 490 bar para llenar depósitos a 350 bar en el vehículo, así como la recuperación de capital de cada equipo asumiendo un 10%, después del retorno de los impuestos. Se estima que el hidrógeno puede ser producido a 1,15 \$ por galón de gasolina equivalente,

asumiendo que el gas natural cuesta 6 \$/MBTU. Se asume que los costes del gas natural son 3,50 \$/MBTU para el caso de las plantas de producción central de hidrógeno. (1 MBTU= 1000 BTU; 1 BTU= 1055,056 Julios; 1 MBTU=1055,056 kJ)

El coste de producir hidrógeno en una planta y transportarlo, tanto si es líquido como si es gaseoso, es dos veces mayor que el coste de producirlo in situ a partir de gas natural. Para los vehículos eléctricos híbridos de hidrógeno, el coste efectivo por milla del hidrógeno producido in-situ sería aproximadamente 1,37 \$/gge debido al rendimiento inferior de los HEV con respecto a los FCV (5,51 vs 65,8 mpgge). Inicialmente se ha considerado que el hidrógeno esta libre de impuestos por tratarse de un combustible limpio, por ello este precio es competitivo con el precio de la gasolina que tiene impuestos (Fig. 17).

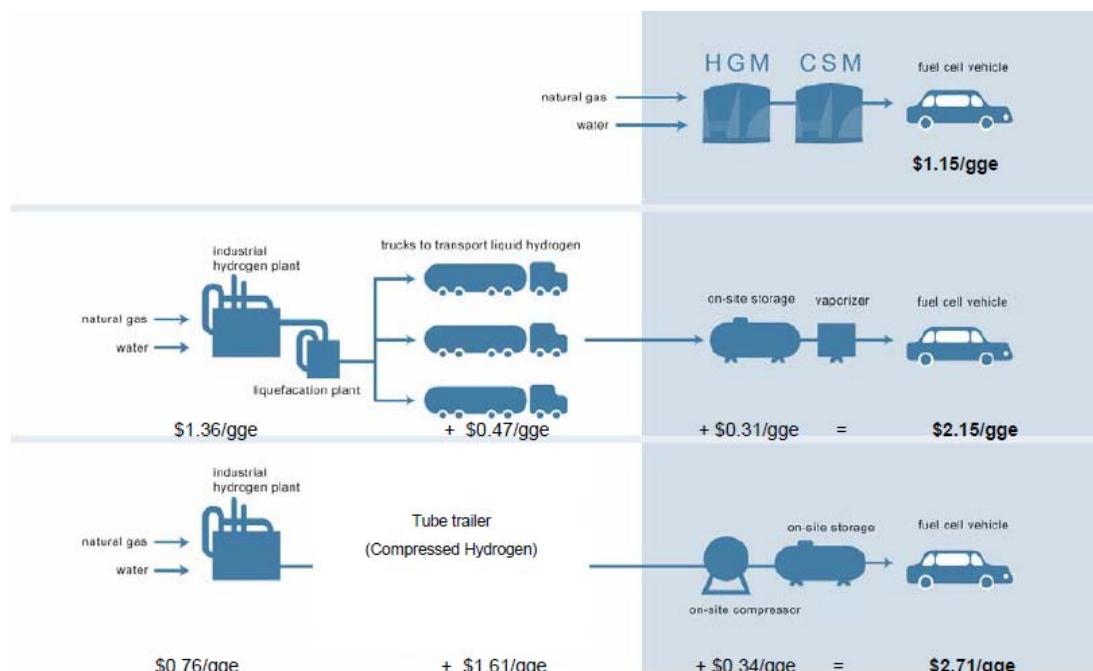


Fig.17 Costes estimados de proporcionar hidrógeno a 490 bares a vehículos mediante tres métodos diferentes: producción de hidrógeno in-situ a partir de reformado de gas natural, transportando hidrógeno líquido y transportando hidrógeno comprimido con trailers tubos. HGM: Modulo generador de hidrógeno. CSM: Modulo de compresión y almacenaje. Fuente: **Thomas CE (3) , 2003.**

Por otro lado, se ha demostrado que tanto el coste de la planta como el coste de la materia prima utilizada tienen una gran influencia sobre el coste de producir hidrógeno (Fig.18 y Fig.19). En cuanto a la producción y la distribución se han obtenido las siguientes conclusiones (**Barthel, Leif-Patrik**):

- El hidrógeno no es fácil de almacenar debido a su baja densidad y elevada difusividad. Y por lo tanto su transporte también es bastante complicado.
- Para incrementar la cantidad de H<sub>2</sub> transportado, la licuefacción es la solución más económicas para el caso de distancias largas y para el caso de distancias cortas se transporta hidrógeno comprimido. Pero hay que tener en cuenta que

la licuefacción requiere mucha energía lo que hace que este proceso no tenga una elevada eficiencia.

- El transporte de hidrógeno presurizado requiere cilindros de acero que pesan demasiado mientras que el hidrógeno transportado pesa poco (300-600 kg por remolque en comparación a los 5.000 kg en el caso de estar licuado).

Una posible solución es producir hidrógeno donde se necesita utilizando infraestructuras ya existentes. Pero el caso de la producción local tiene como desventaja que las plantas pequeñas (en el caso del reformador más que en el caso de la electrólisis) son menos eficientes y hay mayores fluctuaciones de demanda (**Barthel, Leif-Patrik**).

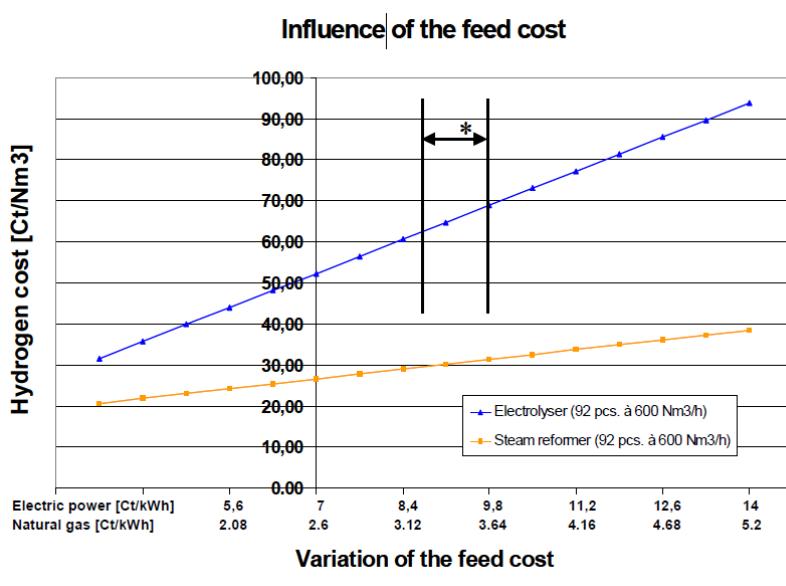


Fig. 18. Influencia del coste de la materia prima sobre el coste de la producción de H<sub>2</sub>. Fuente: (**Barthel, Leif-Patrik**).

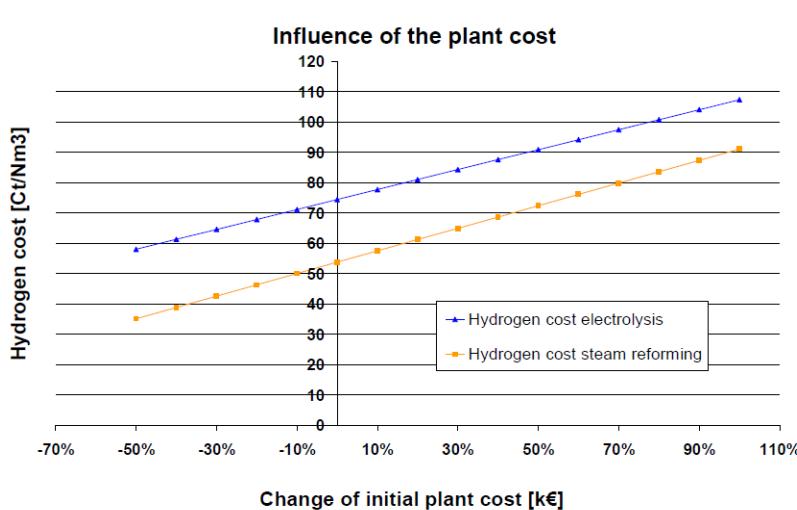


Fig. 19. Influencia del coste inicial de la planta sobre el coste de la producción de H<sub>2</sub>. Fuente: (**Barthel, Leif-Patrik**).

**Roads2HyCom Hydrogen and Fuel Cell Wiki (2013)** llevó a cabo un análisis de costes de la producción de hidrógeno, se consideraron tres tecnologías de producción: reformado, gasificación y electrólisis. Se observa que el coste de producir hidrógeno a partir de hidrocarburos (gas natural, gasolina, etc) es menor que obtenerlo a partir de fuentes renovables (biomas, agua,etc). Los costes de producción de hidrógeno y de transportarlo mediante camiones cisterna se muestra en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Costes de producción y distribución de H<sub>2</sub> en función de la fuente utilizada. Fuente:  
**Roads2HyCom Hydrogen and Fuel Cell Wiki (2013).**

Fuente	Coste (\$/kg)
Gas Natural	2.21
Carbón	3.06
Biomasa	3.53
Agua	6.17

En cuanto a los costes de infraestructura de hidrógeno, se estima que el coste de equipo de abastecimiento in-situ para producir hidrógeno a partir de gas natural será aproximadamente de 760.000 \$ para un sistema que puede abastecer a 1.440 vehículos de pila de combustible, lo que supone un coste capital de 530 \$ para cada vehículo nuevo FCV vendido (**Thomas CE (3), 2003**).

El estudio llevado a cabo por **McKinsey & Company (2011)** afirma que los costes de la infraestructura de hidrógeno son aproximadamente un 5% del coste total del vehículo de pila de combustible (FCV) (1.000 €-2.000€ por vehículo).

Desde la perspectiva de varios proyectos de demostración, el coste de una estación de repostaje sería menor que el coste de los vehículos. El coste inicial de 1.000 vehículos eléctricos híbridos de hidrógeno debería ser 25 millones de \$, mientras que el equipamiento para una estación de servicio para esta flota de vehículos sería menos de 1 millón de \$ (**Thomas CE (3), 2003**).

Los vehículos de pila de combustible están progresando para cumplir con el coste y rendimiento establecidos como objetivo y ya se han cumplido los objetivos establecidos en cuanto a autonomía del vehículo. **Kromer & Heywood (2007)** en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) evaluaron de manera independiente las perspectivas de comercialización de los vehículos de pila de combustible y de los vehículos eléctricos de batería. Concluyeron que con la producción en masa de los vehículos de pila de combustible con una autonomía de 350 millas (560km) se espera que cuesten 3.600 \$ (unos 2.684 €) más que un vehículo convencional y 700 \$ más que un vehículo híbrido. Un vehículo híbrido enchufable con una autonomía de 30 millas (48 km) con la parte eléctrica se espera que cueste 4.300 \$ más que un vehículo convencional y un vehículo eléctrico de batería con una autonomía de 200 millas (320 km) se espera que cueste 10.000 \$ más (unos 7.600 €)(Fig. 20).

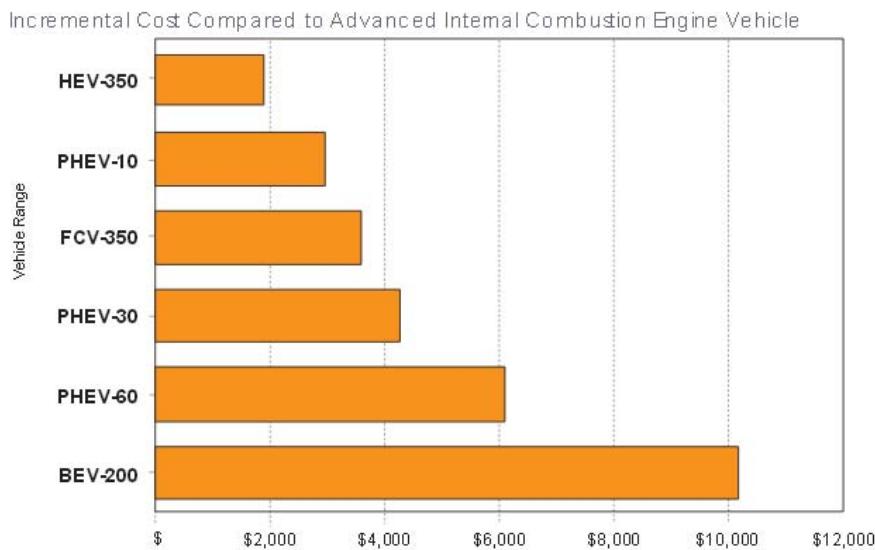


Fig.20. Incremento de coste comparado con un vehículo de motor de combustión interna avanzado.

Fuente: **Kromer & Heywood (2007)**.

La siguiente tabla (*Tabla 10*) compara el estado de la tecnología de pila de combustible y de vehículos híbridos enchufables en el año 2009 con el objetivo establecido por el DOE para el año 2010 y para el año 2015, se utilizan los datos del estudio del MIT (**Kromer & Heywood, 2007**). Se observa que para el caso de la pila de combustible el estado actual está cerca de los datos de entrada del estudio del MIT.

*Tabla 10. Objetivos del DOE, datos del estudio del MIT y estado actual de vehículos de Hidrógeno y de Batería. Fuente: Kromer & Heywood (2007).*

DOE targets<sup>a</sup> and MIT inputs for Fuel Cell, Hydrogen and Battery Status

Fuel Cell	Current Status	DOE 2010 Target	DOE 2015 Target	MIT 2030 Input
Fuel cell system cost (\$/kW)	\$73 <sup>a</sup>	\$45	\$30	\$50
Hydrogen storage cost (\$/kWh)	\$15.5 (30 MPa) <sup>b</sup> \$23 (70 MPa)	TBD	TBD	\$15
Hydrogen storage density (kWh/L)	0.58 (30 MPa) <sup>b</sup> 0.72 (70 MPa)	0.9	1.3	0.8
FCV range (miles)	Over 250	250	300	350

PHEV Battery	Current Status	DOE 2012 Target	DOE 2014 Target	MIT 2030 Input
Battery cost (\$/kWh)	\$1,000 <sup>c</sup>	\$500	\$300	\$320
Battery storage density (kWh/kg)	0.043 <sup>c</sup>	0.057	0.096	0.135
PHEV range (miles)	10	10	40	30

<sup>a</sup> DOE Progress Report to Congress, January 2009. (The projected high-volume manufacturing cost of automotive fuel cell systems has decreased from \$275/kW in 2002 to \$73/kW in 2008.)

<sup>b</sup> Dillich, S. Hydrogen Storage, Presented at DOE annual merit review May 19, 2009 (System volumetric capacity 17-18 g/L [35 MPa] and 19-25 g/L [70 MPa]; average of 17.5 g/L and 21.5 g/L, respectively, yields 0.58 kWh/L and 0.72 kWh/L.)

<sup>c</sup> Howell, D. Energy Storage Overview. Presented at DOE annual merit review May 19, 2009

Los PHEVs son más económicos que los BEVs y los FCEVs a corto plazo. Con las subvenciones y ayudas, los BVEs y FCEVs podrían ser competitivos con los vehículos de motor de combustión interna en el año 2020 (**McKinsey & Company, 2011**).

Se ha estimado que los vehículos de hidrógeno son entre 4 y 5 veces más caros que los vehículos de motor de combustión interna de gasolina/diesel (**McKinsey & Company, 2011**). Para el caso de un vehículo de segmento medio, la diferencia ascendería a unos 150.000 -200.000 € en la fase pre-comercial.

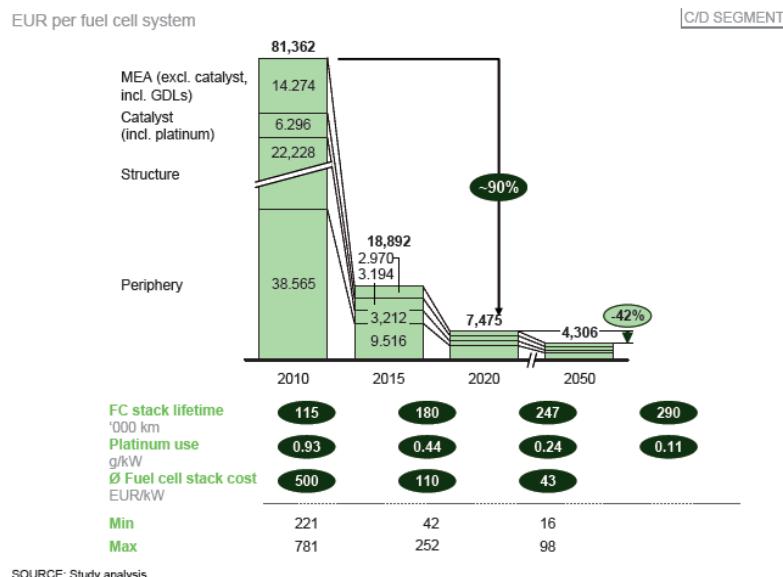
Después de 2025, se espera que el coste final de los vehículos converja en 2050, pudiendo tener los vehículos eléctricos de batería, los vehículos de pila de combustible y los vehículos eléctricos enchufables unos precios competitivos con los vehículos de motor de combustión interna. Se estima en un reciente estudio presentado por el grupo de expertos de combustibles para el transporte, que los costes de infraestructura de hidrógeno va a descender de 12.000 € por vehículo a 3.000 € por vehículo en el año 2020. Después del 2020 se espera que estos costes para el caso del vehículo de pila de combustible sean menores que para el caso de los vehículos de batería. Los costes de producción se espera que se reduzcan en un 40- 50% en los próximos 40 años. Actualmente los costes de producción de hidrógeno para el sector del transporte es 16,6 €/kg entregado en la bomba, con elevados costes al por menor (2/3). Se prevé disminuir este coste en un 70% en 15 años (2010 a 2025) a 5,5 €/kg con el desarrollo de grandes estaciones y plantas (**European Expert Group on Future Transport Fuels, 2011**).

El estudio llevado a cabo por **McKinsey & Company (2011)** también afirma que después del año 2025, el coste total de propiedad (TCO) de todos los tipos de vehículos convergerá. El TCO en este estudio incluye:

- Precio de compra: suma de todos los costes necesarios para entregar el vehículo montado al cliente particularizando para cada tren de potencia y segmento existente.
- Costes de funcionamiento:
  - o Costes de mantenimiento.
  - o Costes de combustible basados en la economía de combustible del vehículo y en la autonomía, incluyendo todos los costes para entregar el combustible en el punto de abastecimiento y los gastos de amortización de capital de las inversiones realizadas para la producción de combustible, distribución y venta al por menor.

Se espera que los vehículos eléctricos de batería (BEVs) y los vehículos de pila de combustible (FCEVs) tengan un precio de compra mayor que los vehículos de motor de combustión interna (ICEs), menor coste de combustible (debido a su gran eficiencia y por no usar petróleo) y menor coste de mantenimiento (ya que tienen menos partes mecánicas).

Dicho estudio (**McKinsey & Company, 2011**) también afirma que se espera que los costes de los sistemas de pila de combustible disminuyan un 90% (*Fig.21*), debido a las economías de escala y a las mejoras en la tecnología.



*Fig.21. Reducción del coste del sistema de pila de combustible. Fuente: McKinsey & Company, 2011.*

La *Fig.21* se ha obtenido a partir de los datos ofrecidos por las empresas participantes en el estudio **McKinsey & Company (2011)**.

El coste del sistema de pila de combustible es el elemento más significativo desde el punto de vista económico en un vehículo de pila de combustible (otros elementos que contribuyen en el coste son el tren de potencia eléctrica y el depósito de hidrógeno). La reducción de coste de los vehículos de pila de combustible, por lo tanto, se debe conseguir mediante las mejoras en la ingeniería y una mayor eficiencia en el proceso de fabricación. Esto incluye:

- Mejoras en el diseño, quitando componentes.
- Uso de nuevos materiales, sustituyendo el uso de platino, reducción de la degradación de la pila de combustible.
- Mejoras en la tecnología de producción.
- Economías de escala (1 millón de vehículos de pila de combustible en la Unión Europea para el año 2020).

En España, Carburos metálicos tiene una estación de repostaje de hidrógeno en Zaragoza en la que un kilo de hidrógeno cuesta 12 euros.

El objetivo de coste (en dólares de 2007) establecido por el DOE para el año 2015 son 3,10 \$/kg de H<sub>2</sub> para el caso de plantas de hidrógeno centrales y de 3,70 \$/kg de H<sub>2</sub> para el caso de plantas de hidrógeno distribuidas (**US. Department of Energy, 2013 (2)**).

El estudio **McKinsey & Company (2011)** afirma que el coste del hidrógeno se reducirá un 70% en 2025 debido a la mayor utilización del abastecimiento de hidrógeno y a las economías de escala, por ejemplo, el coste capital de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno se espera que se reduzca un 50% entre el año 2010 y el año 2020.

Este estudio examina dos formas de producir hidrógeno: una producción mixta con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, y otro sin captura ni almacenamiento de CO<sub>2</sub>, que representa el 100% de electrólisis con 80% de energía renovable para el año 2050. Ambos procesos llevan a una producción libre de CO<sub>2</sub> para el año 2050.

El primero es más económico y está basado en una mezcla de combustibles fósiles y de energía renovable (*Fig.22*) y la segunda está basada en su totalidad en energía renovable (*Fig.23*).

Antes del año 2020, el primer tipo de producción (*Fig.28*) asume que el volumen limitado de hidrógeno necesario será producido utilizando reformado de metano centralizado (40%), reformado de metano distribuido (30%) y electrólisis de agua distribuida (30%). Después del año 2020, cuando los costes de los vehículos de pila de combustible hayan disminuido y la demanda de hidrógeno se haya incrementado, se asume reformado de metano centralizado con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (30%); ciclo combinado de gasificación integrado con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (30%); gasificación de carbón con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (10%); electrólisis de agua centralizada (15%) y electrólisis de agua descentralizada (15%).

La *Fig.28* muestra los resultados de la primera mezcla de producción de hidrógeno: en la parte inferior izquierda aparecen los costes de la mezcla de producción elegida. En la parte superior izquierda, los costes del hidrógeno vendido al menor rápidamente alcanzan los 4,50 €/kg, mientras que en la parte superior derecha, las emisiones de CO<sub>2</sub> "del pozo al tanque" (well to tank) recen al principio, y después del año 2020 se reducen rápidamente.

Como puede verse en la parte derecha inferior, el hidrógeno puede ser producido, distribuido y entregado a un coste razonable en el año 2020 a partir de una variedad de materias primas que muestran las condiciones locales y de mercado.

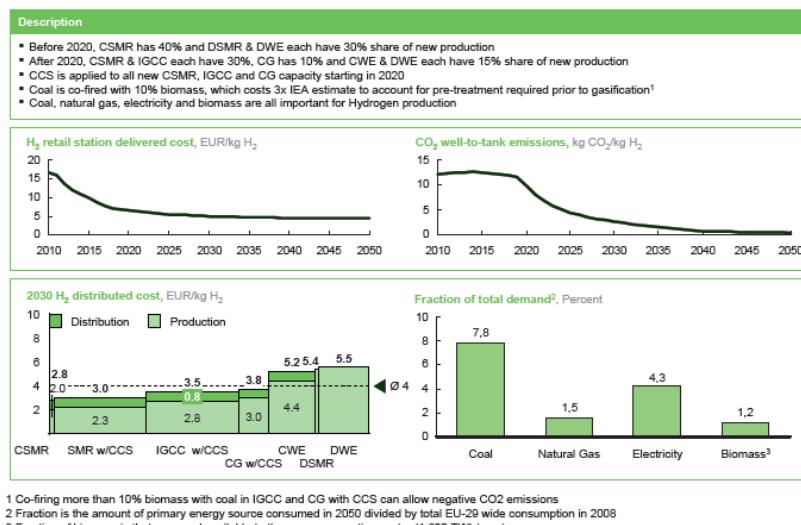


Fig.22. Producción de hidrógeno a partir de una mezcla de combustibles fósiles y de energías renovables.  
Fuente: McKinsey & Company, 2011.

CSMR: Reformado de vapor de metano central.  
 DSMR: Reformado de vapor de metano distribuido.  
 DWE: Electrólisis de agua distribuida.  
 IGCC: Ciclo combinado de gasificación integrado.  
 CWE: Electrólisis de agua centralizada.  
 IEA: Agencia Internacional de Energía  
 SMR: Reformado de vapor de metano.  
 CCS: Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.  
 CG: Gasificación de carbón.

En la siguiente figura se muestra el segundo tipo de producción de hidrógeno analizado.

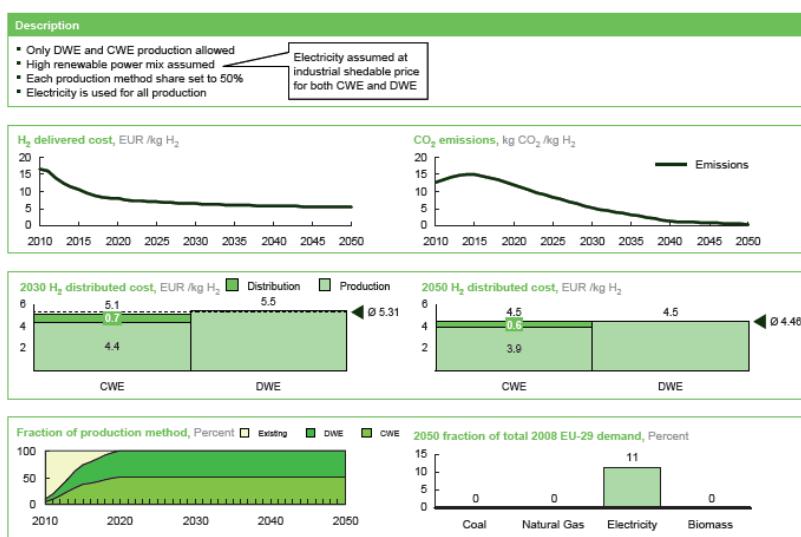
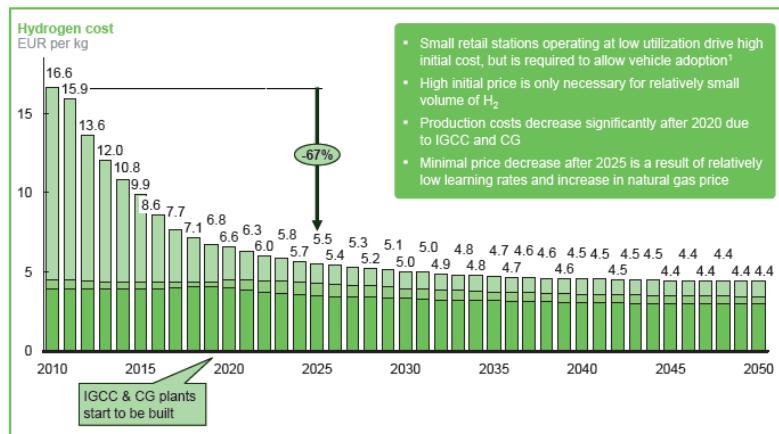


Fig.23. Producción de hidrógeno a partir de una mezcla representando el 100% de la electrólisis, con un 80% de producción renovable para el año 2050. Fuente: McKinsey & Company, 2011.

Delivered at pump, w/o taxes/excises

1 Coverage requirement sets area and retail station density requirements for vehicle adoption

Fig.24. Reducción del coste del hidrógeno sin impuestos ni incentivos. Fuente: **McKinsey & Company, 2011.**

El coste del hidrógeno será elevado durante los cinco primeros años (2010-2015) (Fig.24) como resultado del uso reducido de las estaciones de repostaje y de que las estaciones se construyen pequeñas para reducir los costes. En los siguientes cinco años, cuando las estaciones sean más grandes y su utilización se incremente a medida que hay más FCEVs en la carretera, el hidrógeno sería competitivo con la gasolina.

En cuanto a objetivos, el 7º Programa Marco ha concedido 470 millones de € para el desarrollo del hidrógeno y de las pilas de combustible con el objetivo de fabricar 500 vehículos y 500 autobuses para llevar a cabo una demostración en el año 2015. El coste debería ser de 100 €/kWh para cada pila de combustible, el hidrógeno debería costar 5 €/kg (0,15 €/kWh) y deberían tener una vida de 5.000 horas (**CDTI, SERNAUTO, TECNOEBRO, 2009**).

## **BIBLIOGRAFÍA**

Asensio Paloma, "Hidrógeno y pila de combustible". Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Asociación Española del Hidrógeno, 2013 (1).

[http://www.aeh2.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=4&Itemid=41&lang=es](http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=4&Itemid=41&lang=es)

Asociación Española del Hidrógeno, 2013 (2).

[http://www.aeh2.org/images/stories/AEH2/Genera2013/130227\\_ariema\\_mercadosh2.pdf](http://www.aeh2.org/images/stories/AEH2/Genera2013/130227_ariema_mercadosh2.pdf)

Barthel, Leif-Patrik. Cost Analysis of Hydrogen Infrastructure in Europe. University of Stuttgart.

California Fuel Cell Partnership. "Well to Wheels: A Guide to understanding Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions", 2009.

CDTI, SERNAUTO, TECNOEBRO, 2009. Spanish Capabilities in the Eco-electro Road Mobility Sector and the FP7 Green Cars Initiative.

DOE, U.S. Department of Energy, 2013. Well to Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles.

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13005\\_well\\_to\\_wheels\\_ghg\\_oil\\_ldvs.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13005_well_to_wheels_ghg_oil_ldvs.pdf)

Edwards R., Larivé J-F., Beziat J-C. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-Wheels report version 3c, July 2011. JRC Scientific and Technical Reports. EURO 24592 EN-2011.

European Commission 2013 (1).

[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/air\\_pollution/mi0046\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/mi0046_es.htm)

European Commission 2013 (2).

[http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm)

European Expert Group on Future Transport Fuels. Future Transport Fuels, January 2011.

Franco Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice.

González García-Conde, A. El hidrógeno como vector energético y su aplicación al transporte. Salón del Vehículo y Combustible Alternativos. Valladolid, 2011.

González García-Conde, A. Hidrógeno y pilas de combustible. Aranjuez, 2010.

González García-Conde, A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Asociación Española del Hidrógeno.

Gutiérrez Jodra, Luis. El Hidrógeno, combustible del futuro. Rev. E. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp). Vol. 99, nº 1, pp 49-67, 200 (2005).

IDAE, FITSA. "Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: Situación y perspectivas para automoción", 2008.

Kromer M. and Heywood J. "Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet". Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. Report LFEE 2007-03RP, MIT, May, 2007.

L.B. Systemtechnick, 2005.

[http://www.lbst.de/ressources/docs2006/Posibilidades\\_H2\\_Automocion\\_27OCT2005\\_FINAL.pdf](http://www.lbst.de/ressources/docs2006/Posibilidades_H2_Automocion_27OCT2005_FINAL.pdf)

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis. The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Roadmap 2050 practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, 2010.  
[http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1\\_fullreport\\_PressPack.pdf](http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf)

Roads2HyCom Hydrogen and Fuel Cell Wiki, 2013. Hydrogen Pathway: Cost Analysis. Document Tracking ID 5029. 2013.

Thomas CE, (3). Hydrogen-fueled vehicles: hybrids vs. fuel cells. Presented to the International Vehicle Technology Symposium. 2003.

U.S. Department of Energy, 2013 (1). <http://www.fueleconomy.gov/feg/fuelcell.shtml>

U.S. Department of Energy, 2013 (2). <http://www1.eere.energy.gov/-hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/production.pdf>

White Paper 2011 "Roadmap to a Single Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system".

**ANEXO IV. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO  
DE ESTE TIPO DE COMBUSTIBLE (H2).**

**ANEXO IV. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO DE ESTE TIPO  
DE COMBUSTIBLE (H<sub>2</sub>).**

<b>4.1. Producción de Hidrógeno.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2. Almacenamiento de H<sub>2</sub>.....</b>	<b>11</b>
<b>4.3. Infraestructura de transporte y distribución del hidrógeno.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.1. Transporte como gas comprimido.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3.2. Transporte de hidrógeno líquido.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.3. Infraestructura de distribución de hidrógeno.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3.4. Estaciones de servicio.....</b>	<b>34</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>42</b>

#### **ANEXO IV. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO DE ESTE TIPO DE COMBUSTIBLE (H<sub>2</sub>).**

Se va a revisar y analizar la posibilidad de suministro de este tipo de combustible analizando las características del hidrógeno suministrado.

El uso extendido del hidrógeno necesitará una amplia y nueva infraestructura para producirlo, distribuirlo, almacenarlo y dispensarlo como combustible de automoción. Dependiendo de la fuente a partir de la cual el hidrógeno se produce y la forma en la se distribuye, existen muchas infraestructuras alternativas.

Actualmente existe todavía un número muy limitado de estaciones de repostaje de hidrógeno, y la mayoría tienen carácter privado. Lo más común es que en estas instalaciones se produzca el hidrógeno “in situ”, a partir de fuentes de energía renovables (eólica, solar, etc...) y electrólisis del agua, a partir del reformado de hidrocarburos (gas natural, por ejemplo) o utilizando otras tecnologías (**McKinsey & Company, 2011**).

Un estudio de la Universidad de Zaragoza (**López Peña, Antonio (2008)**), realiza un examen general del estado del arte en la tecnología actual de la producción, distribución y almacenamiento de hidrógeno, y propone sistemas de distribución/suministro de hidrógeno que permitan el abastecimiento de combustible a flotas de automóviles con pila de combustible.

La estrategia de producción de hidrógeno afecta considerablemente al coste y al método de suministro. Si se opta por la producción centralizada, las distancias que haya que transportar el combustible incrementarán considerablemente los costes. Por el contrario la producción distribuida en el punto de uso elimina los costes de transporte, pero repercute en unos costes de producción más elevados, ya que se pierde la economía a gran escala. Una tercera opción es combinar las dos anteriores (producción semi-centralizada) con lo cual se reduce la distancia y los costes relativos.

A continuación se indican las opciones de suministro de hidrógeno:

- a) el hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, después es licuado y suministrado por camiones a las distintas estaciones de servicio.

- b) el hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a las estaciones de servicio.
- c) el hidrógeno procedente de la industria química (por ejemplo, exceso de capacidad en plantas de amoniaco, las cuales hace unos años mejoraron su capacidad de producción, etc...), y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a estaciones de servicio.
- d) el hidrógeno producido en estaciones de servicio vía reformado de gas natural a pequeña escala, o por reformado de líquidos disponibles, que sean portadores de hidrógeno, como pueden ser el metanol o el amoniaco.
- e) el hidrógeno producido vía electrólisis a pequeña escala en estaciones de servicio.

En la actualidad no existe una infraestructura de producción y suministro apropiada para mantener una flota de vehículos basados en pilas de combustible. La producción distribuida a pequeña escala a partir de gas natural ó combustibles líquidos en instalaciones de reaprovisionamiento de combustible es una aproximación posible, pero actualmente los costes son demasiado elevados, y solamente la producción distribuida de hidrógeno no cubrirá toda la infraestructura necesaria basada en la energía de hidrógeno. La producción centralizada ó semi-centralizada de hidrógeno puede reducir considerablemente los costes de producción, pero son necesarios costes más bajos en la tecnología de suministro que permitan la implantación de la infraestructura necesaria. Debe desarrollarse una red de suministro desde la infraestructura existente, basada en los combustibles fósiles, para alojar instalaciones centralizadas y descentralizadas de producción. Los gaseoductos distribuirán hidrógeno a áreas de gran demanda, y camiones y ferrocarriles distribuirán el hidrógeno a zonas rurales ó áreas de baja demanda. La producción In-situ e instalaciones de distribución serán construidas donde la demanda sea lo suficientemente alta para justificar la implantación de estas tecnologías (*Fig. 1*).

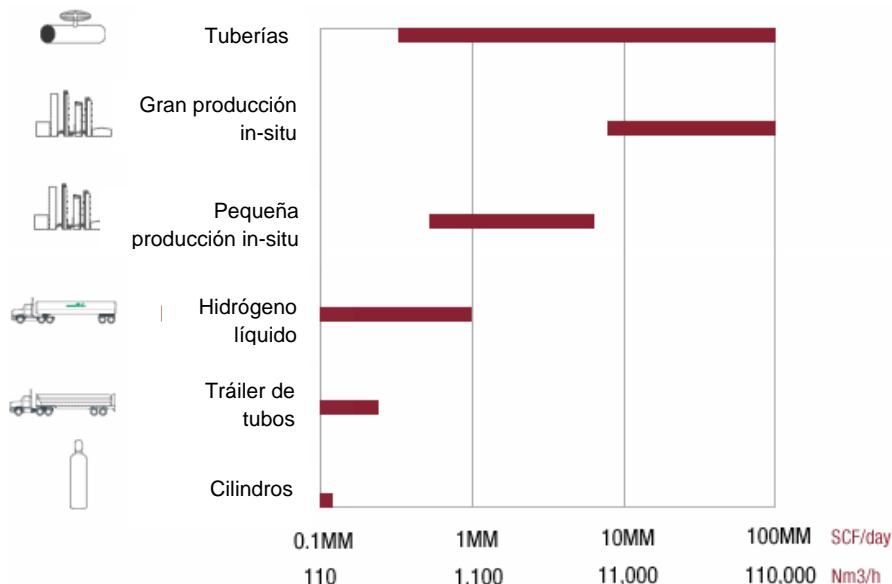


Fig.1 Métodos de distribución de hidrógeno. Fuente: *Air products, 2013*.

En el eje de abscisas aparece scf/day (scf=standard cubic feet). Hay que tener en cuenta las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ millón scf/day} = 2,65 \text{ short tons/day}$$

$$1 \text{ tonelada} = 1000 \text{ kg} = 1,1023 \text{ short tons}$$

**Agnolucci Paolo (2007)** revisó los factores ya descritos en la bibliografía y en los que se establece las deficiencias o problemas que surgen en la introducción del hidrógeno en el sector del transporte. Existen estudios que han analizado los distintos sistemas de transporte en función del porcentaje de penetración del hidrógeno, en función de la utilización de la infraestructura, en función de varias hipótesis sobre la dinámica de los sistemas, en función de los costes de la infraestructura y en función del precio del hidrógeno.

En cuanto a la penetración del hidrógeno en el sector del transporte, este estudio de revisión concluye que la mayoría de estudios están centrados en los vehículos ligeros (LDVs, Light Duty Vehicles), hay pocos estudios sobre autobuses. Con respecto a la velocidad a la que se va a introducir el vehículo de hidrógeno, la mayoría de fabricantes asumen una rápida penetración de los vehículos de pila de combustible. Es útil mencionar que una exitosa introducción de un vehículo en el mercado, como puede ser la introducción de los vehículos híbridos, tarda entorno a una década para alcanzar un 0,5% de cuota de mercado. Pero algunos estudios afirman que la cuota de

mercado de estos vehículos puede pasar de 0,5% a 30% en 30 años. Sin embargo, esta rápida penetración en el mercado no está tan clara según otros estudios.

Dentro de los estudios analizados en esta revisión, se pueden distinguir aquellos que adoptan una penetración a corto plazo, tales como **Bevilacqua, Knight (2001), CHHN (2005)**, o aquellos que adoptan una penetración más especulativa como **Myers et al. (2003)**.

El primer conjunto de estudios analiza la viabilidad de introducir un pequeño número de FCVs (Fuel Cell Vehicles, vehículos de pila de combustible) en una zona geográfica determinada. En general, este tipo de estudios es más probable que obtengan resultados de estimación de costes reales de la construcción de la infraestructura de hidrógeno más exactos. Sin embargo, los estudios con planteamientos a largo plazo tienen un mayor grado de incertidumbre debido al horizonte temporal establecido o a la inmadurez de las tecnologías consideradas.

El factor de capacidad de la infraestructura de producción y distribución del hidrógeno es la relación existente entre la oferta y la demanda de hidrógeno. Los factores de capacidad influyen sobre el precio del hidrógeno necesario para obtener una cierta tasa de retorno sobre la inversión.

De los distintos estudios analizados en esta revisión (**Agnolucci Paolo, 2007**) se puede concluir que el factor de capacidad que aparece en la bibliografía varía ampliamente, desde un mínimo de un 16% hasta un máximo de un 100%. Esto se debe al hecho de que hay diferentes factores de capacidad para distintas tecnologías o para distintos grados de implantación de una misma tecnología en el mercado.

Por otro lado, para una serie de estudios, los factores de capacidad no son constantes como los estudios que evalúan la evolución del hidrógeno en un tiempo determinado. Los factores de capacidad de las estaciones de repostaje convencionales en un mercado desarrollado se establecen entre un 60 y un 70%, factores de capacidad bastante elevados. El 100% se podría alcanzar posiblemente en el caso de las estaciones que abastecan a una demanda constante de una flota de vehículos.

En la bibliografía hay diferentes métodos para analizar la disposición de infraestructuras de hidrógeno. Algunos estudios analizan o se centran en la infraestructura de producción y distribución, otros se centran en la venta al por menor del hidrógeno, mientras que otras se central en la infraestructura total.

En el caso de la distribución de estaciones de venta al por menor de hidrógeno el enfoque más simple consiste en determinar la cantidad de estaciones en un área aplicando un porcentaje (5-15 %) al número actual de estaciones de gasolina que existen en la actualidad (**Agnolucci Paolo, 2007**).

También se ha planteado la posibilidad de que los vehículos incorporen sistemas que localicen las estaciones de repostaje de hidrógeno (el vehículo Honda FCX lo incorpora).

Otro método para determinar el número de estaciones necesarias se basa en la distancia máxima media que los conductores tienen a la estación de hidrógeno más cercana, el número de estaciones se obtiene dividiendo la longitud total de la red por la distancia que separa a cada estación.

También se puede determinar el número de estaciones necesarias mediante la penetración en el mercado de los vehículos de hidrógeno y el hidrógeno que necesitarán para circular por vías interurbanas.

Otros estudios determinan el número de estaciones necesario teniendo en cuenta la cantidad media de tiempo (minutos) que cuesta el viaje de repostaje.

En cuanto a los costes de la infraestructura, las estaciones de hidrógeno serán más caras que las estaciones de otros combustibles alternativos. Según **Wang et al. (1998)** por ejemplo, el coste para convertir una estación de llenado actual para dispensar 50.000 galones de gasolina equivalente por mes es 1,4 millones de USD en el caso del hidrógeno, 0,9 millones para el caso del gas natural comprimido y 0,6 millones para el caso del gas natural licuado.

El elevado coste de las estaciones de llenado in-situ se debe al hecho de que tienen que incluir la infraestructura total necesaria para introducir el hidrógeno en el sector del transporte.

**Weinert (2005)** obtuvo un coste de 5 millones de USD para una estación in-situ de producción de hidrógeno con reformado de metano con capacidad de producción de 1000 kg/día. **GieLEN y Simbolotti (2005)** obtuvieron un coste de 6,3 millones de USD para una estación in-situ de producción de hidrógeno con reformado de metano con capacidad de producción de 1300 kg/día a una presión de 70 MPa. Si se utiliza la presión de 35 MPa las estaciones serían 2 millones más baratas.

En cuanto al precio del hidrógeno, normalmente hay dos formas de considerarlo. Algunos autores consideran una demanda particular y determinan el precio que hace que la infraestructura sea sostenible. Otros autores fijan el precio del hidrógeno para asegurarse que va a ser aceptado.

En el estudio de revisión llevado a cabo por **Agnolucci Paolo (2007)** se concluye que se deben utilizar instrumentos políticos para coordinar a las partes interesadas: persuadiendo a los conductores para que compren vehículos de hidrógeno a pesar de la escasa infraestructura existente, proporcionando una garantía de inversión, contemplando la posibilidad de pérdidas, la venta al por menor de hidrógeno en estaciones, y que el gobierno proporcione compromisos financieramente sostenibles.

A la hora de analizar los estudios existentes hay que tener en cuenta la influencia que tiene, sobre los mismos, la escasez de vehículos de hidrógeno que existen, y la influencia que tienen los impuestos sobre el precio final del hidrógeno.

Existen estudios que analizan una amplia gama de sistemas que utilizan hidrógeno como combustible, desde proyectos a corto plazo en los que se crea una la infraestructura de hidrógeno (en Canadá y California) hasta la caracterización del estado en el que se encontrará dentro de 40-50 años un mercado establecido de hidrógeno. También existen estudio, por lo tanto, que analizan la evolución a lo largo del tiempo (**Johnson et al (2006), Yang and Ogden (2005), y Leiby et a. (2005)**).

La bibliografía analizada coincide en la influencia que tienen los factores de capacidad sobre el precio del hidrógeno.

La *Tabla 1* muestra un resumen de los resultados de encuesta de la literatura realizada por **Mulder y Girard (2004)**, en la que se concluye que las estaciones de hidrógeno de gran tamaño, en las que se produce el hidrógeno in-situ, ofrecen un precio del hidrógeno muy competitivo. Pero estos precios competitivos solamente se pueden conseguir si el mercado esta bien establecido y hay suficientes clientes para justificar el tamaño de las estaciones de servicio (**Moore and Raman, 1998**).

Teniendo en cuenta la relación exponencial entre el número de estaciones y la distancia media a la más cercana (**Nicholas M. (2004)**), no sería aceptable que existiese un número reducido de estaciones de gran tamaño en los primeros días de comercialización de hidrógeno, ya que requeriría que los clientes recorriesen grandes distancias. El precio del hidrógeno dispensado en estaciones centralizadas basado en las tecnologías actuales es de unos 2 \$/kg de H<sub>2</sub>, muy cercano al precio de la gasolina, 1.3 \$/l. El coste del reformado de vapor es 3,5 \$/kg pero disminuye un dólar cuando se utilizan las nuevas tecnologías (**NRC/NAE, 2004**).

Tabla 1. Precio del hidrógeno en función del tipo de estación de repostaje (€/4 litros de petróleo equivalente). Fuente: **Mulder y Girard (2004)**.

	Average	Range
All non-home stations	0.93	0.34    0.93
All non-home stations—non-electro	0.76	0.34    1.28
All non-home stations—electro	1.23	0.66    3.09
On-site and small	0.77	0.66    0.88
On-site and medium	1.02	
On-site medium electro	1.6	0.77    3.09
On-site and big	0.61	0.34    0.97
Home stations	1.74	1.5    2.06
Central	1.11	0.51    2.33
Central—electro	1.84	1.24    1.5
Central liquid—non-electro	0.86	0.59    1.27
Central gaseous—non-electro	1.05	0.51    2.05

En la Tabla 1 también puede observarse que el hidrógeno obtenido mediante electrólisis es más caro que el obtenido mediante otra materia prima. También existen estudios que han optimizado las infraestructuras de distribución de hidrógeno, en concreto existe un estudio llevado a cabo en Andalucía (**Brey et al. 2012**). El uso de vehículos que utilizan hidrógeno como combustible obtenido a partir de fuentes renovables puede ser una alternativa viable para Andalucía, dada la accesibilidad que tiene a las energías renovables, a los problemas actuales de dependencia energética y a los problemas de polución resultantes del actual modelo energético. Sin embargo, la introducción de este tipo de energía requiere una infraestructura inicial que necesitará una inversión inicial de capital, una estrategia consistiría en establecer una red de estaciones para evitar la redundancia y minimizar costes. En este estudio utilizan el Proceso Jerárquico Analítico para clasificar la demanda y los criterios medioambientales de más de 770 municipios de Andalucía de acuerdo a su idoneidad para establecer las estaciones de abastecimiento de hidrógeno. En el estudio, a partir de los resultados optimizan el número de estaciones y su posición para proporcionar una correcta cobertura de la región.

Cada uno de los municipios se caracterizó en base a un número de criterios:

- *Criterio de demanda*, con este criterio se pretende identificar los municipios donde habría probabilidad de que hubiese compradores de vehículos de hidrógeno. Dentro de este criterio hay tres subcriterios:
  - Número de vehículos registrados en cada municipio. La idea es que cuantos más vehículos haya registrados, mayor será la demanda de vehículos de hidrógeno. Se contabilizan el número de vehículos en el año 2008.

- Kilómetros de carretera nacional y regional. Si tienen muchos kilómetros hay mayor probabilidad de que haya una gran demanda de estaciones de hidrógeno.
  - El ingreso per cápita declarado en cada municipio. Los vehículos de hidrógeno costarán más que los convencionales en las primeras etapas. Por lo tanto, es más probable que la demanda de este tipo de nuevos vehículos venga de municipios con elevados ingresos.
- *Criterio de suministro:* Energías renovables. Se considera el hidrógeno producido con energías renovables y para minimizar el coste del transporte, en el estudio, se valorará la existencia de energías renovables en los municipios dónde se coloque la estación.
  - *Criterio medioambiental.* Se caracteriza cada municipio en función de su nivel de contaminación y es un factor que se considera durante el proceso de planificación.

Los resultados muestran que el occidente de Andalucía podría considerarse como el mejor lugar para iniciar a establecer hidrogeneras en Andalucía. Para diseñar la red de estaciones se escogen municipios que se encuentran a más de 25 km. Los resultados indican que 101 hidrogeneras podrían ser suficientes para abastecer a toda Andalucía.

#### 4.1. Producción de Hidrógeno

La producción mundial de H<sub>2</sub> se sitúa en torno a 65 millones de toneladas anuales (**Agencia Internacional de la Energía, 2007**), equivalente a 8EJ (8 exaJulio = 8x10<sup>18</sup> J), menos del 2% del suministro mundial de energía primaria; el 48% proviene del gas natural, el 30% del petróleo, el 18% del carbón y el 4% de la electrólisis (**UNICAMP, 2013; Agencia Internacional de la Energía, 2007**). Es decir, en la actualidad prácticamente el 96% del hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente por reformado de gas natural con vapor de agua. Pero estas tecnologías tienen la desventaja de que en la producción de hidrógeno se emite también CO<sub>2</sub>, y que se utilizan como materias primas recursos agotables. Por otro lado, en España no hay fuente propia de gas natural o petróleo, lo que supone que si se utilizasen estas materias primas para producir H<sub>2</sub> aumentaría la dependencia energética de España.

Como ya es conocido, el hidrógeno no se encuentra en estado libre, por lo tanto, no es un recurso natural o una fuente de energía primaria, sino que se considera un portador de energía también llamado “vector energético”.

En general, puede afirmarse que no es caro producir hidrógeno en una gran planta centralizada, sin embargo, debido a su baja densidad energética por unidad de volumen (10,8 MJ/Nm<sup>3</sup> (**H2moves, 2013**)), los costes de almacenamiento y de transporte si que son elevados.

En las primeras plantas de producción de hidrógeno la producción será de tipo distribuida ya que inicialmente la demanda no será suficiente como para tener un sistema de producción centralizada. El incremento de coste por ser producción distribuida se compensará en cierta medida con la disminución de costes en transporte y distribución. En la siguiente tabla (*Tabla 2*) se especifican las eficiencias y costes medios de las distintas técnicas de producción de Hidrógeno.

*Tabla 2. Eficiencias y costes medios de distintas técnicas de producir H<sub>2</sub>. Fuente: González A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*

PROCESO	EFICIENCIA (%)	DISPONIBILIDAD	CENTRALIZADA/ DESCENTRALIZADA	EMISIONES CO <sub>2</sub> g CO <sub>2</sub> ( kWh H <sub>2</sub> )	PRECIO (€/kWh H <sub>2</sub> )
Gas Natural (SMR sin CCS)	70-75	Ya disponible	Ambas	288-292	0.07-0.1
Gas Natural (SMR con CCS)	60	Medio Plazo	Centralizada	42.7	0.09-0.15
Gasificación Carbón (sin CCS)	50-60	Ya disponible	Centralizada	659	0.07
Gasificación Carbón (con CCS)	40-50	Medio Plazo	Centralizada	20.3	0.08
Gasificación Biomasa	56	Medio Plazo	Descentralizada (cerca del recurso)	0	0.07-0.08
Electrólisis (con Eólica)	65-70	Corto Plazo	Ambas	0	0.11-0.15
Electrólisis (con Red Eléctrica)	30	Ya disponible	Descentralizada	440	0.2
Ciclos Termoquímicos (Energía Solar)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.18
Ciclos Termoquímicos (Energía Nuclear)	30	Largo Plazo	Centralizada	0	0.06

SMR: Steam Methane Reforming (Reformado con vapor de agua). CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage (Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y almacenamiento).

El hidrógeno puede ser producido por varias fuentes, bien desde combustibles fósiles (gas natural o carbón) o bien desde fuentes de energía renovables (biomasa, solar, eólica, hidroeléctrica,...).

El reformado y la electrólisis para la producción de hidrógeno constituyen procesos que ya están disponibles comercialmente y, gracias a ello, pueden desempeñar un papel clave a la hora de satisfacer la demanda energética del hidrógeno a corto y medio plazo. El hidrógeno se produce en estos momentos en cantidades significativas, y es probable que ya se disponga de suficiente cantidad como para introducir el hidrógeno como combustible, aunque todavía no pueda abastecer una demanda masiva.

El hidrógeno es hoy más costoso que los combustibles convencionales, pero se espera que se pueda producir en Europa con costes por kilómetro recorrido competitivos, en comparación con los costes de la gasolina y del diesel. La fiscalidad de cada combustible puede jugar un papel clave en la competitividad del hidrógeno frente a los combustibles convencionales. Se han de obtener ahorros tanto en la producción del hidrógeno y las pilas de combustible como en el almacenamiento del primero.

La seguridad de suministro de la energía, el agotamiento de los recursos fósiles y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a medio y largo plazo impulsarán, en cualquier caso, la transición hacia tecnologías con emisiones de CO<sub>2</sub> bajas o neutras. Esta transición se apoyará en el hidrógeno obtenido a partir de fuentes renovables, incluyendo la biomasa, así como en la energía nuclear y en el uso de combustibles fósiles. En este último caso, y para luchar contra el cambio climático, se deberán considerar técnicas de captura o secuestro del carbono.

Los Estados miembros de la Unión Europea y la Comisión Europea tendrán un papel importante a la hora de estimular la I+D de las tecnologías del futuro. El desarrollo de posturas comunes respecto a las políticas de introducción en el mercado de las tecnologías ya maduras será igualmente otro aspecto clave en este contexto.

En el período de transición se deberán considerar medidas políticas que mejoren la viabilidad económica de la producción del hidrógeno a partir de tecnologías con emisiones de CO<sub>2</sub> bajas o neutras. Tales medidas deberán ser coherentes con las metas políticas fijadas por la Comisión Europea y los Estados miembros: diversidad e independencia energética, y reducción de la generación de gases de efecto invernadero.

## 4.2. Almacenamiento de H<sub>2</sub>

Debido a su baja densidad, el hidrógeno es un gas costoso de almacenar. No obstante existe una gran variedad de posibilidades para su almacenamiento de forma que puede seleccionarse la técnica más adecuada para cada aplicación (*Tabla 3*).

*Tabla 3. Propiedades del Hidrógeno en distintos estados comparadas con las propiedades de la gasolina.*

	Gasolina Referencia	H <sub>2</sub> comprimido 34-69 MPa	H <sub>2</sub> líquido 20 K	M. Hidruro FeTi (1,2%)
Energía MJ	664	664	664	664
Peso combustible (kg)	13,9	4,7	4,7	4,7
Peso tanque (kg)	6,3	63,3-86	18,6	547,5
Peso Sistema Combustible (kg)	20,4	67,9-90,5	23,3	552
Volumen (l)	18,9	409-207	178	189,3

El hidrógeno se puede almacenar a bordo de los vehículos, en la planta donde se produce el hidrógeno o en las estaciones de repostaje.

Las distintas formas de almacenar el hidrógeno se pueden agrupar en:

- Almacenamiento físico de H<sub>2</sub> gas comprimido en depósitos a elevada presión (700 bar).
- Almacenamiento físico de H<sub>2</sub> criogénico (enfriado a -253°C y a presiones entre 6-350 bar) en depósitos aislados.
- Almacenamiento en materiales avanzados (almacenamiento sólido), dentro de la estructura o sobre la superficie de ciertos materiales (mediante adsorción), así como en forma de componentes químicos que mediante una reacción liberan hidrógeno.

En las aplicaciones de automoción el objetivo establecido por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) es almacenar 5 kg de hidrógeno (equivale a una autonomía de unos 500 km en un vehículo con pila de combustible) y que la densidad de almacenamiento pueda alcanzar del 5 al 6% en peso (o expresado en densidad, 60 kg/m<sup>3</sup>). También se requiere que el hidrógeno se libere a temperaturas entre 80 y 150°C, que el tiempo y energía necesaria para el llenado sean pequeños y que el coste del tanque no sea muy elevado.

A continuación se muestra una tabla (*Tabla 4*) con los objetivos de almacenamiento de hidrógeno a bordo establecidos por el DOE:

*Tabla 4. Objetivos DOE para los sistemas de almacenamiento de Hidrógeno. Fuente: DOE, 2013 (1).*

Targets for on-board hydrogen storage systems: Current R&D focus is on 2010 Targets

Table I. DOE Technical Targets: On-Board Hydrogen Storage Systems<sup>a,b,c</sup>

Storage Parameter	Units	2007*	2010	2015
Usable specific energy from H <sub>2</sub> (net useful energy/max system mass) <sup>d</sup> ("Gravimetric Capacity")	kWh/kg (wt% hydrogen)	1.5 (4.5%)	2 (6%)	3 (9%)
Usable energy density from H <sub>2</sub> (net useful energy/max system volume) ("Volumetric Capacity")	kWh/L (kg H <sub>2</sub> /L)	1.2 (0.036)	1.5 (0.045)	2.7 (0.081)
Storage system cost <sup>e</sup>	\$/kWh net (\$/kg H <sub>2</sub> )	6 (200)	4 (133)	2 (67)
Fuel cost <sup>f</sup>	\$ per gallon gasoline equivalent at pump	3	1.5*	1.5*
Operating ambient temperature <sup>g</sup>	°C	-20/50 (sun)	-30/50 (sun)	-40/60 (sun)
Cycle life (1/4 tank to full) <sup>h</sup>	Cycles	500	1000	1500
Cycle life variation <sup>i</sup>	% of mean (min) @ % confidence	N/A	90/90	99/90
Minimum and Maximum delivery temperature of H <sub>2</sub> from tank	°C	-20/85	-30/85	-40/85
Minimum full-flow rate	(g/s)/kW	0.02	0.02	0.02
Minimum delivery pressure of H <sub>2</sub> from tank, FC=fuel cell, ICE=internal combustion engine	Atm (abs)	8 FC 10 ICE	4 FC 35 ICE	3 FC 35 ICE
Maximum delivery pressure of H <sub>2</sub> from tank <sup>j</sup>	Atm (abs)	100	100	100
Transient response 10%-90% and 96-0%	s	1.75	0.75	0.5
Start time to full-flow at 20°C <sup>k</sup>	s	4	4	0.5
Start time to full-flow at minimum ambient <sup>l</sup>	s	8	8	2
System Fill Time for 5-kg hydrogen	min	10	3	2.5
Loss of useable hydrogen <sup>m</sup>	(g/h)/kg H <sub>2</sub> stored	1	0.1	0.05
Permeation and leakage <sup>n</sup>	Scm/h	Federal enclosed-area safety-standard		
Toxicity		Meets or exceeds applicable standards		
Safety		Meets or exceeds applicable standards		
Purity <sup>o</sup> (H <sub>2</sub> from storage system)		98% (dry basis)		

Useful constants: 0.2778kWh/MJ, ~33.3kWh/gal gasoline equivalent.

Notas tabla4:

a: Basado en el PCI del hidrógeno y para una autonomía mayor de 300 millas, los objetivos son para el sistema completo, incluyendo depósito, material, válvulas, reguladores, tuberías, etc.

b: A menos que se indique lo contrario, todos los objetivos son tanto para motores de combustión interna como para pilas de combustible.

c: Los sistemas deben ser energéticamente eficientes. Eficiencia sistemas de almacenaje a bordo: 90%. Eficiencia sistemas de almacenaje que no están a bordo: 60%.

d: Generalmente la masa total (incluye al hidrógeno).

e: US\$ del año 2003, el coste total incluye la sustitución de cualquier elemento si es necesario durante 15 años o 150.000 millas de vida útil.

f: US\$ del año 2001, incluye los gastos como licuefacción, compresión, regeneración, etc. Los objetivos de 2015 están basados en el coste de producción de 1,50\$/galón equivalente de gasolina sin impuestos.

g: Temperatura ambiente más carga solar. No está permitida la degradación de rendimiento de -20°C a 40°C. La degradación permitida fuera de estos límites es la TRD.

h: Equivalente a 100.000, 200.000 y 300.000 millas respectivamente (actual especificación para el depósito de gasolina). Todos los objetivos deben alcanzarse al final de la vida útil.

j: A corto plazo se deberá poder abastecer hidrógeno comprimido a 10.000 psi, hidrógeno líquido o hidrógeno refrigerado (77K) a 5.000 psi. A largo plazo, se prevé que las presión de suministro se reducirá entre 80 y 150 atm para los sistemas de almacenamiento en estado sólido.

j: A temperatura de funcionamiento.

l: El flujo debe comenzar en un 25% del tiempo establecido como objetivo.

m: La pérdida total de hidrógeno desde el sistema de almacenamiento, incluyendo el H<sub>2</sub> correspondiente a fugas o ventilación, está relacionado con la pérdida de autonomía.

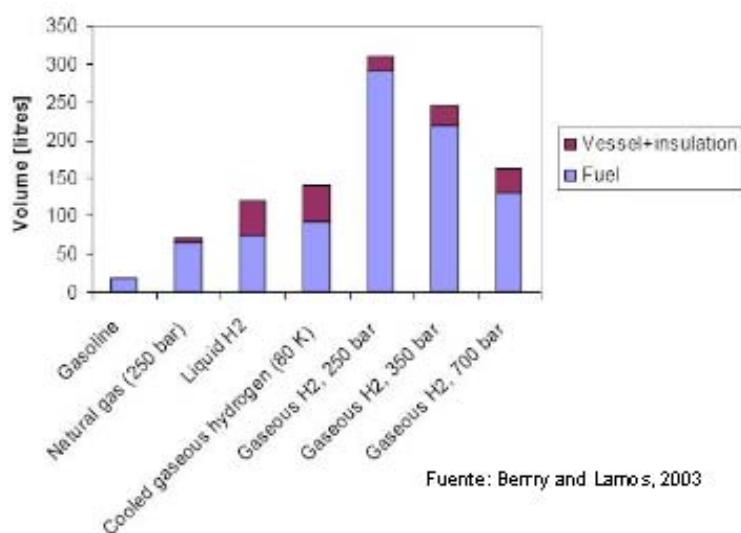
n: Pérdida de H<sub>2</sub> al ambiente.

o: Para los sistemas de pila de combustible, niveles para estado estacionario menos de 10 ppb de azufre, 1 ppm de monóxido de carbono, 100 ppm de dióxido de carbono, 1ppm de amoniaco, 100 ppm de hidrocarburos, oxígeno, nitrógeno y argón no pueden exceder de 2%. Los niveles de partículas deberán cumplir la norma ISO 14687.

Los objetivos de esta tabla están basados en el PCI del hidrógeno. Los objetivos son para el sistema completo, incluyendo depósito, material, válvulas, reguladores, tuberías, soportes de montaje, aislamiento, capacidad de refrigeración y otros componentes de la planta.

Todos estos objetivos deben cumplirse al final de su vida útil (aproximadamente, 1.500 ciclos o 5.000 horas de operación, equivalente a 150.000 millas (241.000 km)).

En la siguiente figura (*Fig.2*) se observa que el hidrógeno líquido y el gaseoso a presión de 700 bar son las formas de almacenamiento del hidrógeno que ocupan menos volumen, pero son de 7 a 9 veces más voluminosos que un tanque de gasolina para un contenido de combustible equivalente. El almacenamiento sólido en hidruros metálicos puede ofrecer una densidad volumétrica de tres a cuatro veces mayor que la del hidrógeno gas, pero su peso es muy superior y todavía no están demostrados comercialmente.



*Fig.2. Comparativa del volumen ocupado por la gasolina y por el hidrógeno variando sus propiedades.*  
Fuente: Berry and Lamos, 2003.

Los métodos tradicionales de almacenamiento son:

- **Almacenamiento en forma gaseosa.** El **hidrógeno como gas** se almacena a presión en botellas convencionales de acero o en tanques ligeros de fibra de carbono que han demostrado su capacidad de operar a presiones de 350 bar. En el caso de las aplicaciones de automoción, mientras que un almacenamiento a esta presión puede

ser suficiente para la operación de autobuses, en turismos se requieren presiones más elevadas al objeto de reducir el volumen total del tanque. La solución apunta al uso de botellas de almacenamiento de 700 bar, pero todavía se encuentran en fase de demostración.

Las densidades energéticas de combustible y almacenamiento a alta presión (700 bar) son comparables al hidrógeno líquido, pero están todavía por debajo de las de la gasolina y el gasóleo; el almacenamiento a alta presión está aún en fase desarrollo.

Una alternativa a esta forma de almacenamiento, para aplicaciones de automoción, lo ofrecen las microesferas de vidrio (Holow glass microspheres (HGM)). El proceso de carga del hidrógeno se realiza aprovechando la permeabilidad del hidrógeno a alta presión (350-700 bar) y temperaturas de 300°C en los huecos de las microesferas en un envase resistente a la presión. Una vez realizada la carga, el sistema se enfriá hasta la temperatura ambiente de forma que el gas queda retenido entre las microesferas. Los principales problemas que presenta esta técnica son la baja densidad volumétrica y las altas presiones de llenado. Esta solución está siendo investigada (**Mohtadi Rana et al. 2011**).

A continuación se muestra una tabla con la clasificación de los distintos tipos de depósitos de almacenamiento de hidrógeno comprimido (*Tabla 5*):

*Tabla 5. Clasificación de los distintos dispositivos de almacenamiento de hidrógeno comprimido: Fuente: National Hydrogen Energy Roadmap. United States Department of Energy, 2002.*

■ Type 1: all metal cylinder
■ Type 2: load-bearing metal liner hoop wrapped with resin-impregnated continuous filament
■ Type 3: non-load-bearing metal liner axial and hoop wrapped with resin-impregnated continuous filament
■ Type 4: non-load-bearing non-metal liner axial and hoop wrapped with resin-impregnated continuous filament
■ Type 5 (Other): type of construction not covered by Types 1 to 4 above.

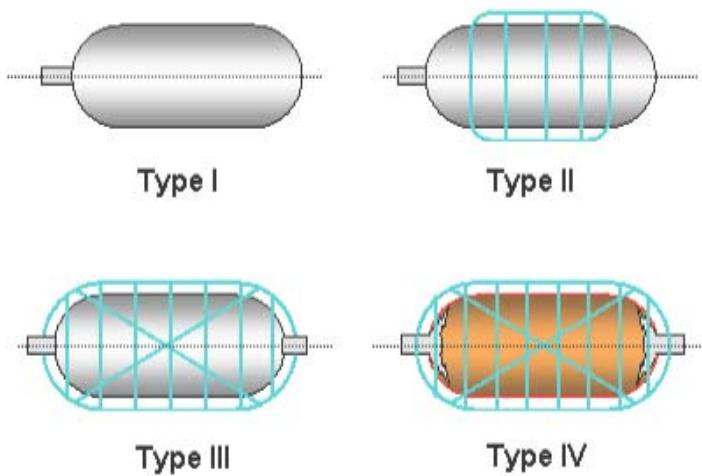


Fig.3. Esquema de los cuatro tipos de depósitos de almacenamiento de  $H_2$  a presión. Fuente: Barral et al. (2006).



Figure 2 : pressure vessels pictures

Fig.4. Imágenes de distintos tipos de depósito de hidrógeno a presión. Fuente: Barral et al. (2006).

En la Fig.3 y en la Fig.4 aparecen esquemas e imágenes de los distintos tipos de depósitos a presión de hidrógeno existentes en el mercado.

En la Tabla 6 se puede observar que solamente el tipo de tecnología IV cumple todos los criterios de diseño y hasta ahora no cumple la condición de gravimetría, volumétrica y de coste (6% en masa, 1,5 kWh/l y 4 \$/kWh, respectivamente).

Tabla 6. Estado del arte de los depósitos a presión para hidrógeno a presión, a bordo de los vehículos:  
Fuente: Villalonga S. et al. . Composite 700 bar-vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage.

Manufacturer	Lincoln composites (US)	Quantum technologies (US)	Dynetek (Canada, Germany)	Ullit (France)	Faber (Italy)	Luxfer (UK)
	Tuffshell®	Trishield®	Dyneceil®			
Type	IV	IV	III	IV	III	III
Nominal Pressure (bar)	700	700	350 700	700	700	345
Liner Material	PE	PE	Alu	PA6	Steel	Alu
Composite Fiber	GF + CF	CF	CF	CF	CF	CF
Gravimetric Rate (%)	3.9 to 5.3	2.5	3.6 5.2	5.4	/	3.4
Volumetric rate (kWh/L)	0.75 to 0.8	0.8	0.5 /	0.66	/	0.66
Burst Pressure (bar)	1,750	1,650	830 1,900	>1,645	/	/
Number of Cycles from 20 to 875 bar	/	/	/ /	>15,000	/	/
H <sub>2</sub> Permeation rate (N cm <sup>3</sup> / h / L)	/	/	/ /	< 0.05	/	/
Vessel Cost Estimation (\$/KWh) for 100,000 vessels/year	/	/	/ /	≈13	/	/
Sources	<i>Lincoln Composites Web Site</i>	<i>DOE report 2004/2005</i>	<i>Dynetek, Storky Web Site</i>	<i>Storky Web Site</i>	<i>Faber Web Site</i>	<i>Luxfer Web Site</i>

Los depósitos de hidrógeno comprimido (5.000 psi (~35 MPa) y 10.000 psi (~70 MPa) se certifican en todo el mundo según las normas ISO 11439 (Europa), NGV-2 (U.S.) y Reijikijun Betten (Islandia) y aprobados por TÜV (Alemania) y el Instituto de Seguridad de gas a elevada presión de Japón (KHK). Los depósitos se han probado en distintos prototipos y están disponibles comercialmente. Los depósitos de composite de 70 MPa tienen un factor de seguridad de 2,35 (23,500 psi de presión de explosión) como requerimiento establecido por las especificaciones del proyecto europeo de hidrógeno integrado (**DOE, 2013 (2)**).

- **Almacenamiento en forma líquida.** El hidrógeno puede almacenarse en forma líquida a temperaturas criogénicas (-253°C), tiene como ventaja su densidad energética por unidad de volumen (muy superior a la del hidrógeno gas). Se pierde algo de hidrógeno por evaporación y la energía almacenada todavía no es comparable a los combustibles fósiles líquidos. Tiene como desventajas que en el proceso de licuación se consume aproximadamente del 30 al 40% del poder calorífico inferior (PCI), mientras que el proceso de compresión in-situ requiere entre un 5 y un 20% del PCI y los requerimientos energéticos para almacenar hidrógeno a 700 bar e hidrógeno líquido son respectivamente un 4 y un 10% del PCI (**DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009**). Otra desventaja es que existen pérdidas por evaporación y resulta imprescindible utilizar contenedores criogénicos aislados.

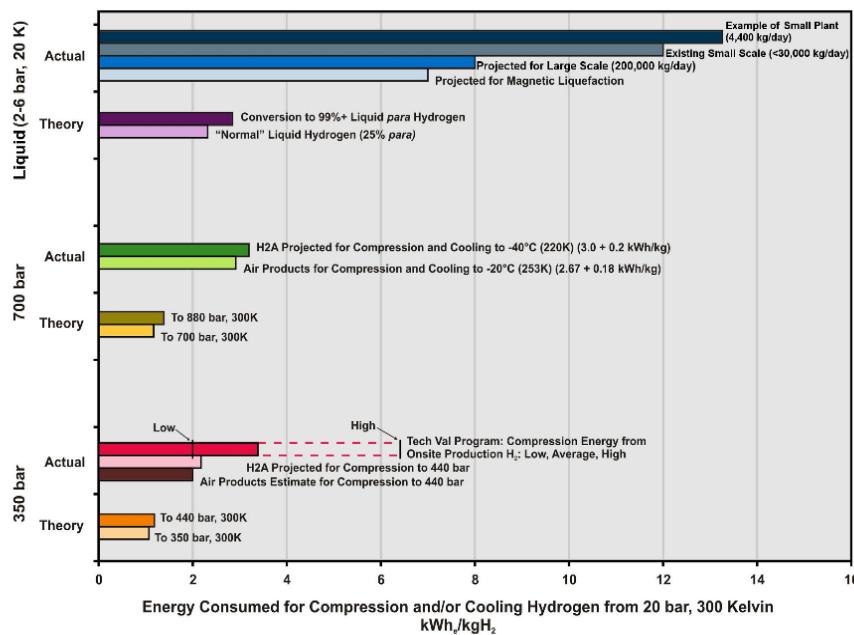


Fig.5. Energía necesaria para almacenar en un vehículo hidrógeno en diferentes estados termodinámicos.  
Fuente: **DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009.**

Los depósitos de hidrógeno líquido ( $\text{LH}_2$ ) pueden almacenar más hidrógeno en un volumen dado que los depósitos de hidrógeno en estado gaseoso comprimido. La capacidad volumétrica del hidrógeno líquido es 0,070 kg/l, comparado con 0,030 kg/l para depósitos de gas de 10.000 psi. Estos depósitos se han probado en vehículos de hidrógeno, y el concepto de depósito híbrido combinando el almacenamiento como gas a alta presión y el almacenamiento criogénico, se está estudiando. Estos recipientes (depósitos crio-comprimidos) son más ligeros que los hidruros y más compactos que los depósitos a elevada presión y a temperatura ambiente. Esto se debe a que las temperaturas necesarias no son tan bajas como las necesarias para el caso de hidrógeno líquido, hay menos pérdida de energía por licuefacción y menos pérdidas por evaporación que en el caso de depósitos de hidrógeno líquido. (**DOE, 2013 (2)**).

Tabla.7. Energía necesaria para almacenar en un vehículo hidrógeno en diferentes estados termodinámicos. Fuente: **DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009.**

		Color	kWh/kg [Reference]	Notes: theoretical minimum energies are in addition to 1.02 kWh/kg H <sub>2</sub> needed to reach 20 bar, 300 Kelvin
LH <sub>2</sub> 20K, 2-4 bar	Actual	[Dark Blue]	13.4[11]	Existing Small Plant (4,400 kg/day)
		[Grey]	12.0[4]	Existing Medium Scale (<50,000 kg/day)
	Theoretical	[Blue]	8.0[4]	Projected Large Scale (200,000 kg /day)
		[Light Blue]	7.0[6]	Projected for Magnetic Liquefaction
350 bar	Actual	[Red]	2.89[1]	Conversion to 99%+ Liquid <i>para</i> hydrogen
		[Purple]	2.34[1]	"Normal" Liquid Hydrogen (25% <i>para</i> )
	Theoretical	[Dark Red]	2, 3.1, 4[2]	Tech Val Program: Compression Energy from On-site Production H <sub>2</sub> : Low, Average, and High
		[Green]	3.2 [9]	H2A Projection for Compression and Cooling from 25°C to -40°C (233K) (3.0+ 0.2 kWh/kg)
700 bar with fast fill to 880 bar	Actual	[Light Green]	2.9 [10]	Air Products for Compression and Cooling from 30°C to -20° C (253K) (2.67 + 0.18 kWh/kg)
		[Yellow]	1.47[1]	To 880 bar, 300K
	Theoretical	[Olive]	1.35[1]	To 700 bar, 300K
		[Gold]		
350 bar with fast fill to 440 bar	Actual	[Pink]	2.2 [9]	H2A Projected for Compression to 440 bar
		[Brown]	2.0 [10]	Air Products estimate for Compression to 440 bar
	Theoretical	[Orange]	1.15[1]	To 440 bar, 300K
		[Orange]	1.05[1]	To 350 bar, 300K

Referencias de la tabla:

- [1] NIST Web book site: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- [2] NREL Composite Data Products from the DOE Tech Validation Program  
[http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/cdp/cdp\\_61.ppt](http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/cdp/cdp_61.ppt)  
Refueling Station Compressor Efficiency, CDP #61, 3/2/09
- [3][http://www.nextenergy.org/Modules/Document/upload\\_documents/FuelingSpecificationfor70MPaCompressedHydrogenVehiclesReleaseVersionA.pdf](http://www.nextenergy.org/Modules/Document/upload_documents/FuelingSpecificationfor70MPaCompressedHydrogenVehiclesReleaseVersionA.pdf)
- [4] Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage for Automotive Applications. TIAx LLC, Argonne National Laboratory, 2009. [http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen\\_publications.htm#h2\\_storage](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen_publications.htm#h2_storage)
- [5] Report "H2A Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis Models and Conventional Pathway Options Analysis Results", May 2008. [http://www.hydrogenenergy.gov/h2a\\_delivery.htm](http://www.hydrogenenergy.gov/h2a_delivery.htm)
- [6] Peschka, W. (1992). "Liquid Hydrogen" Springer-Verlag, New York.
- [7] Active Magnetic Regenerative Liquefier, John Barclay, Prometheus Energy DOE. Annual Merit Review, May 2009.  
[http://www.hydrogenenergy.gov/pdf/review09/pd\\_37\\_barclay.pdf](http://www.hydrogenenergy.gov/pdf/review09/pd_37_barclay.pdf)
- [8] DOE, Website on Tank Safety.  
[http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcell/storage/hydrogen\\_storage\\_testing.html](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcell/storage/hydrogen_storage_testing.html)
- [9] DOE Hydrogen Delivery Website and Model.  
[http://www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_delivery.htm1](http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_delivery.htm1)
- [10]Personal communication with Joseph P. Cohen at APCI.
- [11]M. Bracha et al., "Large-Scale Hydrogen Liquefaction in Germany" *International Journal of Hydrogen Energy* 19 (Jan 1994) pp. 53-59.

La Fig. 5 y la Tabla 7 (con referencias) contiene la energía necesaria para el almacenamiento de hidrógeno en tres condiciones diferentes (350 bar, 700 bar, y 1 bar a 20 K). La compresión de hidrógeno (isotérmica) desde 20 bares a 350 bares solamente requiere 1,05 kWh/kg H<sub>2</sub>, con un incremento de 0,10 kWh/kgH<sub>2</sub> para alcanzar los 440 bar de abastecimiento.

Solamente se necesita 1,35 kWh/kgH<sub>2</sub> para comprimir hidrógeno a 700 bar, con un incremento de 0,12 kWh/kgH<sub>2</sub> para alcanzar los 880 bar de presión de abastecimiento. La licuefacción a partir de hidrógeno a 20 bar (gas) necesita una energía de 2,3 kWh/kg LH<sub>2</sub>, también se necesita 0,65 kWh/kg LH<sub>2</sub> para pasar de un estado de equilibrio a temperatura ambiente a un estado de equilibrio a 20 K.

Actualmente el hidrógeno se comprime mediante un compresor. En estaciones de hidrógeno con un flujo de 1000 kg/día estos compresores pueden alcanzar un rendimiento isoéntropico de un 56% el motor una eficiencia del 92%.

En la actualidad las opciones que existen de almacenamiento son: el almacenamiento gaseoso en botellas de fibra de carbono a 350-700 bar y el almacenamiento criogénico, ambas opciones son muy caras.

El **almacenamiento sólido** (almacenamiento de hidrógeno por absorción), si se compara con el gaseoso o líquido, tiene el potencial de almacenar una cantidad equivalente de hidrógeno en menor volumen y a menores presiones y consumiendo menos energía, pero todavía está en su estado inicial de desarrollo. Aunque todavía es pronto para saber cuál es la mejor opción, los hidruros metálicos son los más desarrollados y pueden llegar a alcanzar un 8% en peso (90 kg/m<sup>3</sup>) a presiones entre 10 y 60 bar. Pero los hidruros complejos, material bajo investigación, pueden ser más atractivos a largo plazo.

La elección de la tecnología del sistema de almacenamiento en los vehículos es crítica ya que condiciona la infraestructura de producción, distribución y llenado que debe establecerse.

Por otro lado existen otros tipos de almacenamiento que están en desarrollo o están siendo investigados. Estas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno pueden dividirse en almacenamiento sólido, donde las moléculas de hidrógeno se almacenan (almacenado hidrógeno puro mediante compresión o licuefacción) y el almacenamiento químico, dónde se almacenan hidruros.

El **almacenamiento sólido** es potencialmente seguro y eficiente tanto para aplicaciones de transporte como estacionarias. Dentro de este tipo de almacenamiento se encuentra:

- **Almacenamiento de Hidrógeno criocomprimido (CcH<sub>2</sub>).** Es la única tecnología que cumple los objetivos establecidos por la DOE para el año 2015

en cuanto a eficiencia volumétrica y gravimétrica (*Argonne National Laboratory, 2009*). Hay estudios que demuestran que la crio-compresión presenta interesantes ventajas en cuanto a costes: el coste por kilómetro y el coste por vehículo son más bajos que para otra tecnología. Un sistema de hidrógeno crio-comprimido costaría 0,12\$/milla (incluido el coste del combustible), mientras que los vehículos de gasolina convencionales cuestan entre 0,05 y 0,07\$/milla.

Este sistema utiliza hidrógeno frío (20,3 K) para conseguir una elevada densidad energética. Pero en este caso a diferencia del caso de almacenamiento líquido, cuando el hidrógeno se calienta le permite alcanzar presiones más elevadas (hasta 350 bares frente a los 2 bares del caso de hidrógeno líquido). Con depósito crio-comprimido se consigue una elevada autonomía, alcanzando lo 1050 km.

- Los **materiales basados en el carbono** (nanotubos de carbono y nanofibras de grafito). Se están estudiando distintas estructuras con base de carbono, entre las que se encuentran los nanotubos, que permiten una elevada densidad de almacenamiento de hidrógeno, siendo, además, muy ligeras. Pueden resultar baratas en función de su producción, estando actualmente en fase de investigación y desarrollo.
- **Hidruros metálicos:** Los hidruros metálicos se basan en aleaciones metálicas que absorben hidrógeno gaseoso. A través de una reacción química se forman compuestos sólidos metálicos, liberando calor. De modo inverso, el hidrógeno se libera cuando se aplica calor. La molécula de hidrógeno se absorbe primero en la superficie y después se disocia como átomos de hidrógeno. Empieza a estar disponible alguna tecnología de almacenamiento de hidrógeno sobre sólidos metálicos. Es un sistema muy seguro ya que el hidrógeno se almacena sobre el sólido. La forma de los depósitos de almacenamiento puede adaptarse a las necesidades de cada aplicación. El llenado exige circuito de refrigeración debido al calor de la reacción, aunque existe la posibilidad de reutilizar los efectos térmicos en subsistemas. Al utilizarse metales para fijar el gas, los pesos se elevan considerablemente y pueden degradarse con el tiempo. Actualmente es una tecnología bastante cara.
- **Hidruros químicos:** Las reacciones de formación de hidruros reversibles son bien conocidas, p. ej.,  $\text{NaBH}_4$ . Son sistemas compactos con reducido tamaño pero plantean problemas con la manipulación de residuos y en lo que se refiere a las infraestructuras necesarias.

- **Otros medios:** microesferas de vidrio, mezcla de hidruros, nanotubos de nitruro de boro, Bulk Amorphous Material BAM, ...

Para explicar cómo se utilizan las microesferas de vidrio para almacenar hidrógeno gaseoso a bordo de un vehículo hay que basarse en tres pasos: carga, llenado y descarga. Primero, las esferas de vidrio se llenan con H<sub>2</sub> a elevada presión (350-700 bar) y a elevada temperatura (aprox. 300°C) por permeabilidad en un depósito a elevada presión. Después las microesferas son enfriadas a temperatura ambiente y transferidas al depósito del vehículo a baja presión y por último las microesferas se calientan a 200-300°C para liberar de forma controlada el H<sub>2</sub> para que funcione el vehículo. La principal desventaja de esta tecnología es que tiene una densidad volumétrica baja y la elevada presión necesaria para el llenado. Las microesferas tienen lentamente fugas de hidrógeno a temperatura ambiente. Por otro lado es fácil que se rompan durante el funcionamiento. También tiene ventajas, las microesferas de vidrio son seguras ya que almacenan hidrógeno a una presión relativamente baja, lo que permite que los depósitos utilizados no sean caros. Ha demostrado una densidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> de 5,4%. Es necesario que se investigue para reducir la temperatura de liberación a menos de 100°C (*International Energy Agency, 2006*).

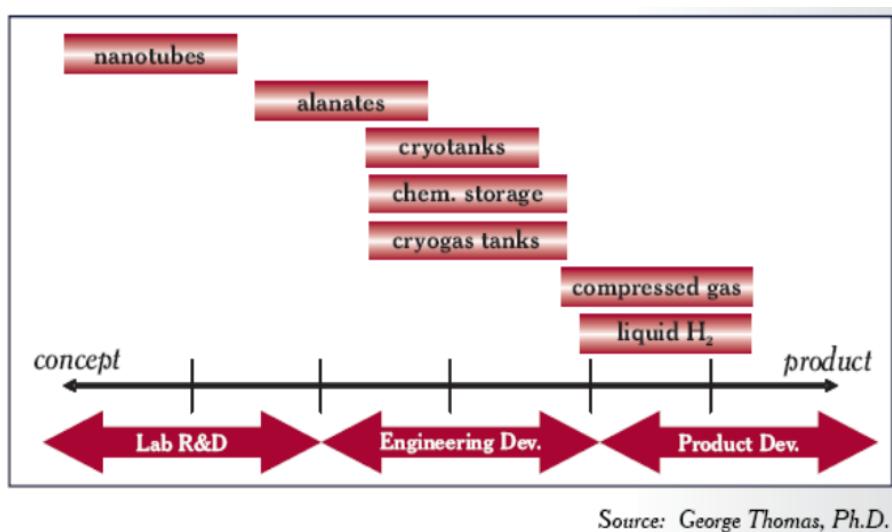
Resumiendo, uno de los aspectos claves en el desarrollo de los vehículos de pila de combustible es el almacenamiento y transporte del hidrógeno en los vehículos, para ello existen diversas tecnologías que tienen sus ventajas e inconvenientes. A continuación se detallan las más destacables con sus ventajas e inconvenientes:

- Repostar y almacenar en el vehículo un compuesto que contenga una alta proporción de hidrógeno (metanol, etanol o gas natural) para ser reformado a bordo. El inconveniente es que el H<sub>2</sub> así generado puede contener impurezas que hagan necesaria una limpieza del gas antes de ser utilizado en la pila de combustible.
- Utilización de H<sub>2</sub> como gas comprimido a 200 bares de presión. En este caso la densidad energética es muy baja y por lo tanto los recipientes a presión son voluminosos y pesados. El almacenamiento a muy alta presión (700 bar) está aún en fase de desarrollo.
- Almacenamiento del hidrógeno en forma de líquido criogénico a una temperatura de -253°C. Tiene una buena densidad energética, aunque todavía menor que la de los combustibles fósiles líquidos. Esta solución es cara por la

cantidad necesaria de energía para licuar el gas y por las características especiales de los depósitos de almacenamiento.

- Utilización de hidruros metálicos, de manera que el hidrógeno queda retenido en la estructura sólida del hidruro metálico y puede liberarse a medida que la pila de combustible lo demande. El inconveniente es su elevado peso. Además de estas tecnologías existen otras, como el empleo de hidruros químicos, o la utilización de estructuras de tubos microscópicos de carbono o de microesferas de vidrio. En estos últimos dos casos se trata de tecnologías que están todavía en fase de investigación.

En la siguiente figura (*Fig. 6*) puede verse el estado actual de la tecnología en cuanto a almacenamiento de hidrógeno se refiere.



*Fig.6. Estado de la tecnología de almacenamiento de H<sub>2</sub>. Fuente: National Hydrogen Energy Roadmap. United States Department of Energy, 2002.*

En la siguiente figura (*Fig.7*) se observa una comparativa de los distintos métodos de almacenamiento de hidrógeno en función de su capacidad gravimétrica y de su capacidad volumétrica.

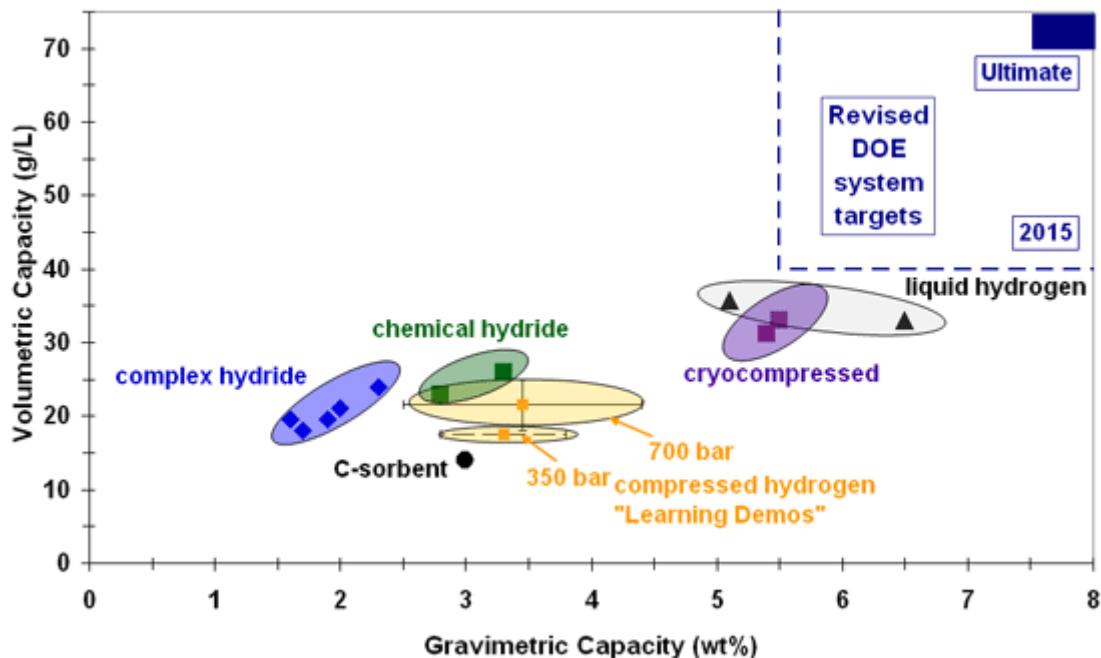


Fig.7. Comparativa de los distintos métodos de almacenamiento de  $H_2$  en función de su capacidad gravimétrica y volumétrica. Fuente: DOE, 2013(3).

En la siguiente tabla se muestra el estado actual de varias tecnologías de almacenamiento en cuanto a peso, volumen y coste se refiere (Tabla 8).

Tabla.8. Estado actual de varias tecnologías de almacenamiento. Fuente: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009.

Tecnologías de almacenamiento	Peso (kWh/kg)	Volumen (kWh/l)	Coste (\$/kWh)
Hidruros químicos	1,6	1,4	8
Hidruros metálicos	0,8	0,6	16
Hidrógeno líquido	2,0	1,6	6
Hidrógeno comprimido (70 MPa)	1,9	1,3	16
Objetivos DOE (2015)	3,0	2,7	2

Los cambios necesarios en el almacenamiento de hidrógeno en los vehículos tienen como objeto hacer que la tecnología sea capaz de almacenar la cantidad de hidrógeno necesaria para una autonomía de conducción de 300 millas, cumpliendo los requerimientos de peso, volumen, durabilidad, eficiencia y coste total. Las tecnologías que se utilizan actualmente en la automoción son, como se ha señalado anteriormente, los sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido a 350-700 bar. Se ha demostrado que los vehículos pueden alcanzar una autonomía de 250

millas (ciclo combinado de conducción de la agencia de protección de medioambiente de U.S.) con sistemas de hidrógeno comprimido a 700 bar.

La capacidad de almacenamiento de H<sub>2</sub> de los sistemas de hidrógeno comprimido a 350-700 bar, está comprendido entre 2,8 y 4,4 % en peso y 0,017-0,025 kgH<sub>2</sub>/l en volumen.

La *Tabla 9* incluye el estado actual proyectado para distintos sistemas de almacenamiento. Se deben llevar a cabo algunos cambios importantes para conseguir alcanzar los objetivos de rendimiento y seguridad establecidos. Se tienen que hacer mejoras sustanciales en cuanto a peso, volumen, y coste de estos sistemas para su aplicación en la automoción (**DOE, 2013 (4)**).

*Tabla 9. Desarrollo proyectado de los distintos sistemas de almacenamiento de Hidrógeno<sup>a</sup>.*

Fuente: **DOE, 2013 (4)**.

Hydrogen Storage System	Gravimetric (kWh/kg sys)	Volumetric (kWh/L sys)	Cost (\$/kWh; projected to 500,000 units/yr)	Year Published
700 bar compressed (Type IV) <sup>b</sup>	1.7	0.9	19	2010
350 bar compressed (Type IV) <sup>b</sup>	1.8	0.6	16	2010
Cryo-compressed (276 bar) <sup>b</sup>	1.9	1.4	12	2009
Metal Hydride (NaAlH <sub>4</sub> ) <sup>c</sup>	0.4	0.4	TBD	2012
Sorbent (AX-21 carbon, 200 bar) <sup>c</sup>	1.3	0.8	TBD	2012
Chemical Hydrogen Storage (AB-liquid) <sup>c</sup>	1.3	1.1	TBD	2012

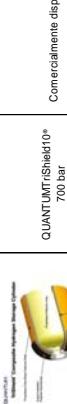
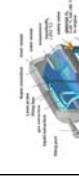
<sup>a</sup> Assumes a storage capacity of 5.6 kg of usable H<sub>2</sub>

<sup>b</sup> Based on Argonne National Laboratory performance and TIAx cost projections<sup>8</sup>

<sup>c</sup> Based on Hydrogen Storage Engineering Center of Excellence performance projections<sup>9</sup>

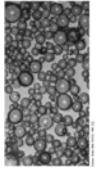
En la siguiente tabla (*Tabla 10*) se muestra un resumen de las principales tecnologías de almacenamiento de H<sub>2</sub> analizadas junto con los objetivos establecidos por el DOE para el año 2015. También se muestra el estado de desarrollo en el que se encuentran y las ventajas e inconvenientes que presenta cada una de las tecnologías.

Tabla 10. Tabla resumen de las principales tecnologías de almacenamiento de H<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Almacenamiento	Tipos	Eskema	Estado comercial	Capacidad almacenamiento H <sub>2</sub> (wt%)	Propiedades	Ventajas	Inconvenientes
		OBJETIVOS DOE (2015)		9.1	Energía Específica gravimétrica	Energía Específica volumétrica	Coste
Hidrógeno comprimido	QUANTUM (US): 	Baseline 129 <sup>(1)</sup> Vessel 1 <sup>(1)</sup> (2010) Vessel 7 <sup>(1)</sup> (2011)	Comercialmente disponible. QUANTUM/SHIELD® 700 bar	5,8 <sup>(4)</sup>	1.9 kWh/kg <sup>(4)</sup> 3.0 kWh/kg <sup>(4)</sup>	1.3 kWh/l <sup>(4)</sup> 2.7 kWh/l <sup>(4)</sup>	16 \$/kWh <sup>(4)</sup>
	LINCOLN COMPOSITES (US): DYNATEK (Alemania): ULLIT (Francia) FABER (Italia) LUXFER (UK)	TuffCell® DyneCell® Comercialmente disponible. Comercialmente disponible. Comercialmente disponible. Comercialmente disponible.	Comercialmente disponible. TuffCell® DyneCell® Comercialmente disponible. Comercialmente disponible. Comercialmente disponible.	76 kg <sup>(1)</sup> 64.9 kg <sup>(1)</sup> 56.63 kg <sup>(1)</sup> 39.52 kg/kg <sup>(2)</sup> 5.2 kWh/kg <sup>(2)</sup> 5.4 kWh/kg <sup>(2)</sup> No consta 3.4 kWh/kg <sup>(2)</sup>	1.50 kWh/kg <sup>(1)</sup> 1.67 kWh/kg <sup>(1)</sup> 1.78 kWh/kg <sup>(1)</sup> 3.9 5.2 kWh/kg <sup>(2)</sup> 5.2 kWh/kg <sup>(2)</sup> No consta No consta No consta No consta	No consta No consta No consta No consta No consta No consta	22.45 \$/kWh (barra de carbono 11 \$/lb) <sup>(1)</sup> 21.75 \$/kWh (barra de carbono 11 \$/lb) <sup>(1)</sup> 20.80 \$/kWh (barra de carbono 11 \$/lb) <sup>(1)</sup>
Hidrógeno líquido	LINDE		Comercialmente disponible pero caro. 	6,1 <sup>(4)</sup>	2.0 kWh/kg <sup>(4)</sup>	1.6 kWh/l <sup>(4)</sup>	6 \$/kWh <sup>(4)</sup>
Hidruros metálicos		R&D					
			Hidruros metálicos de base zirconio con titanio, vanadio y níquel. Hidruros activados de magenesio. Hidruros metálicos compuestos alótropos: NaAlH <sub>4</sub> , Mg(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> NH	Simples: 0.8 kWh/kg <sup>(4)</sup> Complejos: <0.8 kWh/kg <sup>(4)</sup>	Simples: 1.8 kWh/kg <sup>(4)</sup> Complejos: <0.6 kWh/kg <sup>(4)</sup>	Simple: 10.5\$/kWh <sup>(4)</sup> Complejo: 16.5\$/kWh <sup>(4)</sup>	

<sup>(1)</sup> DOE, 2012 (1). <http://inventore.energy.gov/patent/13211118/20110614-hydrogen-storage-device-for-on-board-compressed-gaseous-hydrogen-store.pdf><sup>(2)</sup> Vialam S., Noni F., Maglier C., Werne J.L., Thomas E., Dennis B., Mazahrad P., Composite 700 bar vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage.<sup>(3)</sup> Agencia Internacional de la energía, 2012. <http://www.eia.doe.gov/petroleum/publications/regulations/publication/hydrogen.pdf>

Tabla 10. Tabla resumen de las principales tecnologías de almacenamiento de H<sub>2</sub> (continuación). Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Almacenamiento	Tipos	Esquema	Estado comercial	Capacidad de almacenamiento H <sub>2</sub> (wh%)	Propiedades			Ventajas	Inconvenientes
					Masa	Energía Específica gravimétrica	Coste		
<b>OBJETIVOS DOE (2015)</b>									
Hidruros químicos	CaH <sub>6</sub> , MH <sub>2</sub> , LiH, LiBH <sub>4</sub> , NaBH <sub>4</sub>		R&D	7.5-10.5 <sup>(1)</sup>		3.0 kWh/kg	2.7 kWh/l	2 \$/kWh	
Nanotubos de carbono		Diametro: 1-2 nm Longitud: 1-3 mm 10-100 tubos paralelos	Viable en laboratorio (pequeñas muestras).	No consta	No consta	1.6 kWh/kg <sup>(4)</sup>	1.4 kWh/l <sup>(4)</sup>	8 \$/kWh <sup>(4)</sup>	Más seguro que el almacenamiento como hidrógeno comprimido o líquido.
MWNT (single-walled)		Diametro: 2-10nm Longitud: 1 μm 2-15 tubos coaxiales	Vialidad tecnológica: haría falta sintetizar muchas más "grandes" con la pureza necesaria.	No consta	No consta				Más seguro que el almacenamiento como hidrógeno comprimido o líquido. Puede que tengan altas desviaciones de almacenamiento. Ligeras. Pueden resultar económicas.
MWNT (multi-walled)		Diametro: 2-10nm Longitud: 1 μm 2-15 tubos coaxiales	Vialidad tecnológica: haría falta sintetizar muchas más "grandes" con la pureza necesaria.	No consta	No consta				Más seguro que el almacenamiento como hidrógeno comprimido o líquido. Puede que tengan altas desviaciones de almacenamiento. Ligeras. Pueden resultar económicas.
Microesferas de vidrio			R&D		No consta	No consta	No consta	No consta	Baja densidad volumétrica. Elevada presión de llenado. Figuras lentas de hidrógeno a temperatura ambiente. Fácil rotura durante el funcionamiento.

(1) DOE, 2013 [5], [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuels/pdfs/mf2011\\_pilot\\_navy\\_leavitt.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuels/pdfs/mf2011_pilot_navy_leavitt.pdf)

(2) Villalonga S., Navarro F., Maglier C., Yerres I.I., Thomas C., De mas B., Mazzatorta P., Composite 700 bar vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage. (3) Agencia Internacional de la Energía, 2013, <http://www.iea.org/publications/free-publications/publications/hydrogen.pdf>

(4) Wilson John R. Hydrogen storage technologies, for transportation, auxiliary power generation and military applications., July 2011

Por último hay que tener en cuenta que si en vez de almacenarse hidrógeno puro, se almacena un hidrocarburo líquido o un alcohol del cual se obtiene posteriormente el hidrógeno mediante un proceso de reformado, resulta necesario también disponer de un **reformador a bordo del vehículo**. En los vehículos con pila de combustible es necesario, además de dicho sistema de almacenamiento a bordo, disponer de un motor eléctrico que impulse el vehículo y suministre potencia al resto de elementos auxiliares. El motor y los elementos auxiliares, por otra parte, son similares a los que se instalan en los vehículos eléctricos o híbridos.

*Tabla 11. Tabla resumen de las principales tecnologías de reformadores. Fuente: Odgen Joan M., 2001 y Elaboración propia.*

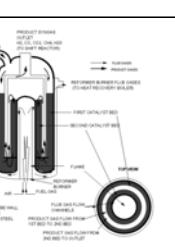
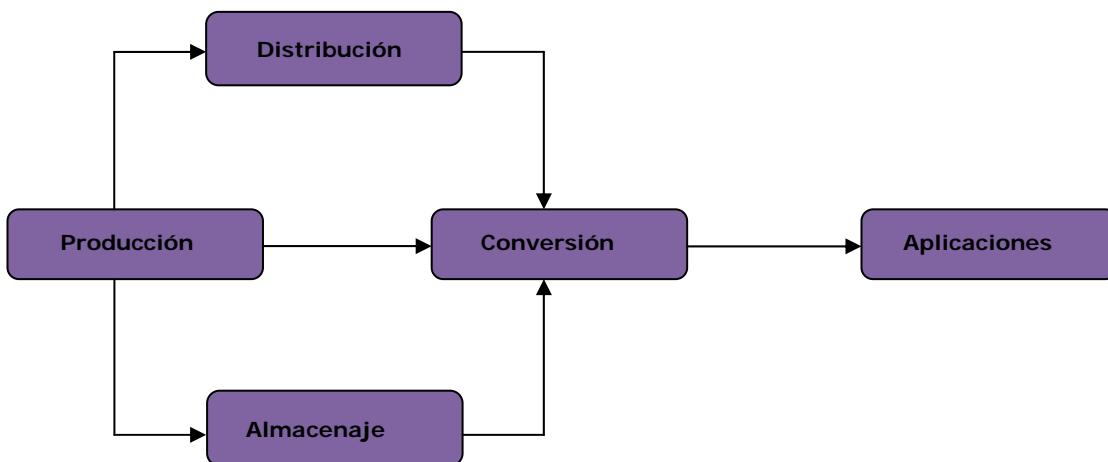
Tipo de reformador	Características	Esquema	Empresa	Estado de desarrollo	Apects para utilizarlo en las estaciones de repostaje de hidrógeno
Reformado de metano con vapor					
1. Reformadores convencionales de metano con vapor	Tubos largos llenos de catalizador. Trabajan a elevadas presiones (15-25 atm) y a elevadas temperaturas (850°C). Uso aleaciones de acero caras. Producción de H <sub>2</sub> de elevada pureza (utilizando purificación PSA (Adsorción a Presión oscilante))		Haldor-Topsøe Howe-Baker KTI Foster Wheeler	Comercial	Coste elevado, gran tamaño, para aplicaciones de estaciones de reabastecimiento de combustible, requiere mucho tiempo para ponerse en marcha, requiere funcionamiento continuo.
2. Reformadores de metano con vapor compacto de tipo pila de combustible con lechos de catalizador anulares concéntricos.	"Reformador de transferencia de calor" inicialmente desarrollado por reformado de gas natural para sistemas de pila de combustible. Conjuntos de catalizadores anulares concéntricos. Baja presión y baja temperatura. Mejora la transferencia de calor entre los lechos		IFC (con PAFC) Ballard Power Systems (con PEMFC) Sanyo Electric (con PAFC, PEMFC) Osaka Gas Co (con PAFC) Instituto Fraunhofer para estudios de energía solar/socios energéticos (con PEMFC). Praxair/IFC para producción de H <sub>2</sub> .	Cerca de la comercialización como parte de los sistemas de pila de combustible.	Es el más barato y compacto de todos los reformadores de metano con vapor. Es un buen suministrador de H <sub>2</sub> para los vehículos.
3. Reformadores de metano con vapor de tipo "plato".			GASTEC Osaka Gas Company Air Products IFC Ishikawajima-Harima Heavy Industries Ztek	R&D Fabricado prototipo de 20kW Ensayado sistema de 1 kW Patentes en este área Patentes en este área Patentes en este área Patentes en este área	Más compacto y más barato que los intercambiadores de tubos y carcassas. Tiempo de arranque más rápido (idóneo para las estaciones de repostaje). Tiene como inconvenientes la vida útil del catalizador y de los recipientes.
4. Reformador de metano con vapor con reactor de membrana para la producción de hidrógeno de elevada pureza.			Tokyo Gas Company Johnson Matthey Aspen Systems European Commission ssCOCLUP/HYSEP project McDermott Technology Inc. Northwest Power Systems Natural Resources Canada Institute of Gas Technology Dais-Analytic	Fabricado y ensayado: reformador de vapor con reactor de membrana, produciendo 15 Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> /h a partir de gas natural R&D sobre membranas de separación de H <sub>2</sub> para reactores de membrana R&D sobre el reactor de membrana para el reformado de vapor de metano, etanol, y gasolina para producir H <sub>2</sub> Desarrollo de membranas para la separación de H <sub>2</sub> Patente sobre el reactor de membrana para reformado de vapor o parcial oxidación con producción de hidrógeno de elevada pureza Patente sobre reformador de vapor de membrana Patente sobre reformador de vapor de membrana Patente sobre reformador de vapor de membrana Patente sobre reformador de vapor de membrana	Cuando se genera reformado de vapor en los reactores de membrana, las funciones del reformador, reactor y etapas de purificación deberían llevarse a cabo en un reactor. Esto reduciría costes y conseguiría reducir la temperatura de operación. Los inconvenientes son el coste y la vida útil de la membrana. En estos temas debe centrarse la R&D.

Tabla 11. Tabla resumen de las principales tecnologías de reformadores (continuación). Fuente: Odgen Joan M., 2001 y Elaboración propia.

Tipo de reformador	Características	Esquema	Empresa	Estado de desarrollo	Apectos para utilizarlo en las estaciones de repostaje de hidrógeno
Oxidación Parcial			Hydrogen Burner Technology, Inc.  Argonne National Laboratory  USDOE Office of Transportation Technologies is supporting development of 50 kW fuel processor/FCV systems by: Hydrogen Burner Technology Epyx/Nuvera McDermott Technology, Inc. and Catalytica	Disponible comercialmente el reformador de oxidación parcial para pilas de combustible.  R&D sobre reformadores de oxidación parcial para FCVs.  R&D del procesador de combustible para pila de combustible de 50 kW	Los sistemas de oxidación parcial ofrecen unos costes menores para la etapa del reformador y un arranque más rápido. Los inconvenientes son los costes de la etapa de purificación.
Reformador autotérmico (ATR)			Argonne National Laboratory International Fuel Cells Fraunhofer Solar Energy Institute  Degussa Metals Catalyst Cerdec  Johnson-Matthey  Hydrogen Burner Technologies, Inc.  Honeywell and Energy Partners	R&D sobre sistemas ATR y catalizadores Diseñado ATR Diseñado ATR  R&D sobre catalizadores ATR  Demostración de ATR con metanol y metano  Ensayo ATR para metano y reformado de combustible líquido  R&D	Combina aspectos deseables del reformado de vapor y de la oxidación parcial.
Reformado de metanol			Xcellsis Fuel Cell Engines  Toyota  Nissan  MERCATOX project  Northeast Power Systems  Mitsubishi Electric  Honeywell  NTT Telecommunications/Tokyo University  Gerhard Mercator Universität	Demostración del reformador de metanol para FCV  Demostración del reformador de metanol para FCV  Demostración del reformador de metanol para FCV  R&D para desarrollar reformador de metanol tipo plato  Demostración de producción de H <sub>2</sub> a partir de metanol  R&D sobre el reformador de metanol tipo plato compacto para FCV  R&D sobre el reformador de metanol tipo plato compacto para FCV  R&D sobre el reformador de metanol tipo plato compacto para FCV  R&D sobre el reformador de metanol tipo plato compacto para FCVs	Todavía en etapa R&D. El metanol es más fácil para reformar que el metano o la gasolina. Para las aplicaciones de estaciones de repostaje de hidrógeno, el
Craqueo de amoníaco			Analytic Power  Kordesch, et al., ZEVCO	Construir un pequeño craqueador de amoníaco para producir H <sub>2</sub>  R&D sobre el craqueo de amoníaco para FCVs	
Reformado con sorbente mejorado			Air Products y Chemical, Inc.	Demostración	Promete tener unos costes capitales inferiores a los reformadores de metano con vapor convencionales.
Membranas de transporte de iones			Air Products on el US DOE y Cerametec, Chevron, Eltron Research, McDermott Technology, Norsk Hydro, Pacific Northwest Laboratory, Pennsylvania State University, University of Alaska, y University of Pennsylvania están desarrollando una tecnología de membrana cerámica para generar H <sub>2</sub> y syngas.  Praxair con Argonne National Lab	R&D  R&D para desarrollar generador de H <sub>2</sub> basado en las membranas de transporte de hidrógeno y oxígeno.	Promete métodos mejorados para la producción de hidrógeno a partir de syngas.
Craqueo catalítico de metano			Centro Energético Solar Florida Universidad Gerhard Mercator	Ciencia Básica Ciencia Básica	Los catalizadores deben ser regenerados frecuentemente para quitar el carbono.
Reformador plasma			MIT INEE	R&D R&D	

#### 4.3. Infraestructura de transporte y distribución del hidrógeno

En la infraestructura energética del hidrógeno un aspecto importante es el sistema de distribución que transporta el hidrógeno desde el punto de producción hasta el punto donde finalmente se utiliza (*Fig.8*). Los requerimientos del sistema de distribución necesariamente varían con el método de producción y con la aplicación final que va a tener el hidrógeno.



*Fig.8. Infraestructura energética del hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.*

Actualmente la infraestructura de hidrógeno es limitada. Si en Europa en 2030 hubiese 40 millones de vehículos de pila de combustible de hidrógeno, se necesitarían 19.000 estaciones de repostaje de hidrógeno, con un coste de 6billones de € -24 billones de € que es comparable a la inversión realizada en la telefonía móvil y en la infraestructura de banda ancha (**Pollet Bruno G. et al. (2012)**).

Los costes de la infraestructura del hidrógeno suponen aproximadamente el 5% del coste total de los vehículos de pila de combustible (FCEVs, Fuel cell electric vehicles) (**McKinsey & Company, 2011**).

- Actualmente existe una limitada infraestructura industrial para la distribución del hidrógeno en forma de líquido criogénico o gas comprimido. Esta distribución se realiza principalmente mediante camiones cisterna aunque también hay redes de tuberías que abastecen a grandes consumidores industriales.
- Tanto la licuación como la compresión del hidrógeno consumen bastante energía lo que incrementa el coste global de la distribución también.

- Los costes asociados al transporte y almacenamiento del hidrógeno son uno de los principales obstáculos que impiden que el hidrógeno sea competitivo en coste con los combustibles convencionales. En el futuro se necesitarán soluciones como la producción descentralizada del hidrógeno en el mismo punto de venta o en sus cercanías.
- Para las aplicaciones en el transporte, los costes de las estaciones de reabastecimiento suponen también un obstáculo importante y requerirán medidas que consideren al hidrógeno como un combustible convencional.
- También se necesitarán iniciativas importantes para promover la aceptación pública del hidrógeno, principalmente en todo lo referido a la seguridad de la infraestructura de suministro y almacenamiento.
- Los costes de inversión que requiere la infraestructura del hidrógeno son masivos y el riesgo es alto por la incertidumbre que rodea a las nuevas tecnologías, y a la fecha y al ritmo de su introducción en el mercado. Superar esta incertidumbre requerirá la cooperación de actores importantes: gobiernos, investigadores, proveedores de tecnología y suministradores de hidrógeno.
- Que el método de transporte sea más o menos económico depende de la cantidad y distancia transportada.
- Si hay producción distribuida en el punto de uso se eliminan los costes de transporte pero aumenta los de producción ya que se pierde la economía de la producción a gran escala.

El hidrógeno se puede transportar de forma gaseosa, de forma líquida o como sólido en un hidruro metálico.

#### 4.3.1. Transporte como gas comprimido

El hidrógeno gas suele ir comprimido en depósitos entre 200-700 bar. Los depósitos convencionales de gas comprimido a 200-350 bar son de acero austenítico, mientras que para presiones superiores, entre 400-700 bar se están desarrollando nuevos materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros o bien de aluminio reforzado con fibra de carbono. Estos depósitos se pueden transportar por carretera en camiones, ferrocarril o barco.

Para el transporte por carretera se utilizan cisternas o trailers de tubos (tube trailers), y tienen un elevado coste variable debido al bajo volumen de hidrógeno que transportan y a la distancia a recorrer, en cambio los gastos fijos son bajos y flexibles. Así que cuando la distancia al lugar de uso final es grande ( $>1000\text{km}$ ) el hidrógeno se licua y se utilizan camiones cisterna criogénicos para su transporte.

Cuando se transportan grandes cantidades de hidrógeno gaseoso para largas distancias, los gaseoductos son la opción más económica. Utilizar los gaseoductos de gas natural para distribuir hidrógeno es una opción que está siendo evaluada para reducir inversiones, si bien hay que tener en cuenta que en general el hidrógeno no puede transportarse por la red de distribución de gas natural debido a los materiales utilizados en los conductores, por ello solamente se está estudiando para utilizar algunas partes de la red de gas natural para transportar mezclas de hidrógeno y gas natural.

Para transportar hidrógeno, como su densidad energética por unidad de volumen es aproximadamente un cuarto de la del gas natural, se necesita o bien una tubería de mayor diámetro o una mayor presión para suministrar la misma cantidad de energía. A igualdad de capacidad energética de la línea de transporte, el coste total de una línea de hidrógeno es del orden de 6 veces el del gas natural.

#### 4.3.2. Transporte de hidrógeno líquido.

También se puede transportar el hidrógeno en forma líquida utilizando cisternas criogénicas, enfriado a  $-253^{\circ}\text{C}$ , con una capacidad de 60.000 litros.

El proceso de licuación consume una gran cantidad de energía primaria y los costes de licuación también son muy elevados, pero presenta una importante economía de escala, por tanto, a partir de un determinado volumen de producción, puede tenerse en cuenta la opción de licuar (Fig. 9.). Es decir, el coste de licuar hidrógeno es menor para una planta de gran escala optimizada y es mayor para una planta pequeña. El coste de licuación disminuye cuando la producción aumenta y llega a un valor de 0,63 \$/kg para una planta a gran escala para una producción de 30.000 kg/h cuando el coste de la electricidad es 0,04 \$/kWh (Fig.10.).(Veziroblus and Sheffield J.W., 1998).

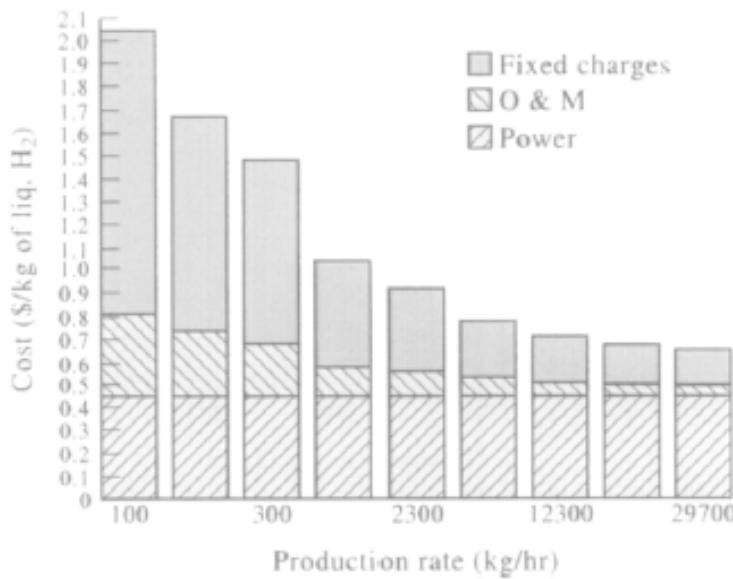


Fig.9.Costes de energía, operación, y mantenimiento y gastos fijos sobre la inversión de capital en un equipo para licuar hidrógeno optimizado de gran escala. Fuente: Syed et al, 1998.

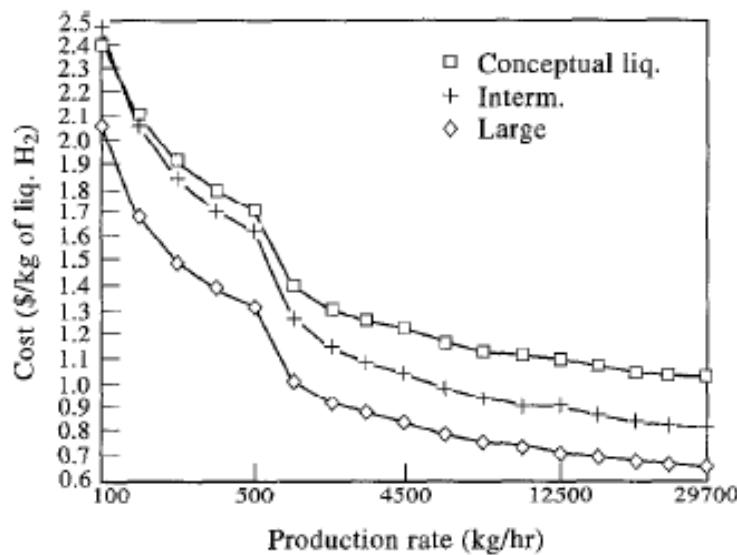


Fig.10.Costes de licuefacción de hidrógeno. Fuente: Syed et al, 1998.

#### 4.3.3. Infraestructura de distribución de hidrógeno.

Actualmente existe una limitada infraestructura industrial para la distribución del hidrógeno en forma de líquido criogénico o gas comprimido. Esta distribución se realiza principalmente mediante camiones cisterna aunque también hay redes de tuberías que abastecen a grandes consumidores industriales.

Los costes asociados al transporte y almacenamiento del hidrógeno son uno de los principales obstáculos que impiden que el hidrógeno sea competitivo en coste con los

combustibles convencionales. En un futuro cercano se necesitarán soluciones innovadoras como la producción descentralizada del hidrógeno en el mismo punto de venta o en sus cercanías.

Para las aplicaciones en el transporte, los costes de las estaciones de reabastecimiento de combustible suponen también un obstáculo importante y requerirán el desarrollo de normativas, códigos técnicos, estándares de normalización y leyes que consideren al hidrógeno como un combustible convencional.

También se necesitarán iniciativas importantes para promover la aceptación pública del hidrógeno, principalmente en todo lo referido a la seguridad de la infraestructura de suministro y almacenamiento.

Los costes de inversión que requiere la infraestructura del hidrógeno son masivos y el riesgo es alto por la incertidumbre que rodea a las nuevas tecnologías, y a la fecha y al ritmo de su introducción en el mercado. Superar esta incertidumbre requerirá la cooperación de actores importantes: gobiernos, investigadores, proveedores de tecnología y suministradores de hidrógeno.

Los gobiernos tendrán un papel particularmente importante a la hora de estimular la innovación a través de la I+D, de apoyar una temprana introducción de las tecnologías en el mercado y de minimizar el riesgo de la inversión privada o industrial.

#### 4.3.4. Estaciones de servicio.

A continuación se muestra un mapa con las hidrogeneras (estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>) que hay a nivel mundial a fecha de hoy (*Fig. 11*):



*Fig.11. Distribución mundial de las distintas estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>. Fuente: H<sub>2</sub> stations, 2013.*

En el mapa anterior se pueden observar las estaciones de repostaje de H<sub>2</sub> que actualmente están operativas (en verde), aquellas que no están operativas (en gris) y aquellas que están planificadas (en amarillo).

Hay un total de 208 hidrogeneras operativas, 107 hidrogeneras fuera de servicio y 105 hidrogeneras planificadas. En general suministran el hidrógeno o bien a presión de 350 bar o bien licuado, y disponen de sistemas de producción de hidrógeno in situ, fundamentalmente basados en reformado de gas natural o en electrólisis de agua, o bien reciben el hidrógeno desde plantas de producción centralizadas.

A continuación se muestra un mapa con las hidrogeneras (estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>) que hay a nivel europeo a fecha de hoy (*Fig. 12*):



Fig. 12. Distribución europea de las distintas estaciones de repostaje de H<sub>2</sub>. Fuente: **H<sub>2</sub> stations, 2013**.

En concreto en España hay 4 hidrogeneras operativas y 4 que no están operativas. Mientras que en Europa hay un total de 80 hidrogeneras operativas en la actualidad y 54 planificadas, estando fuera de operación un total de 41 hidrogeneras.

Centrandonos en las 4 hidrogeneras operativas en España se tiene la siguiente información:

- **Hidrogenera situada en el polígono industrial Walqa (Huesca).** En 2010, impulsada por el Gobierno de Aragón, se inauguró. Walqa ha apostado fuerte por el hidrógeno, acogiendo la sede de Fundación para el Desarrollo de Nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón (*Tabla 12*).

*Tabla 12. Características de la Hidrogenera situada en el polígono industrial Walqa (Huesca). Fuente: H<sub>2</sub> stations, 2013.*

<b>Estado</b>	En operación
<b>Fecha de comienzo</b>	22.06.2010
<b>Últimos cambios</b>	Actualización 18.12.2012, funciona perfectamente
<b>Acceso público</b>	Sí
<b>Ubicación</b>	Aragón (España) 22197 Huesca Parque Tecnológico Walqa, Carretera Zaragoza N330a km 566
<b>Objetivo</b>	Proporcionar una infraestructura de hidrógeno real para la comunidad científica y tecnológica.
<b>Descripción</b>	<p>La Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón ha diseñado esta hidrogenera y es su propietaria. El Gobierno de Aragón ha contribuido en su financiación.</p> <p>Datos básicos: 25 kg/día servidos, 25 kg/día producidos por electrólisis, dos niveles de presión (350 bar y 200 bar). El hidrógeno es producido por electrólisis a partir de agua en un electrolizador alcalino (tecnología Lurgi-IHT). El electrolizador tiene una presión de descarga de 32 bar, que implica un importante ahorro de energía en la siguiente etapa de compresión de hidrógeno. El consumo eléctrico es de unos 70 kW con un caudal de descarga de 10 Nm<sup>3</sup>/h y una pureza del 99,7% (volumen). Con el fin de utilizar el hidrógeno en una pila de combustible, la pureza del hidrógeno se aumenta a la unidad (99,99 %), mientras que el oxígeno pasa a la atmósfera. El almacenaje del hidrógeno se lleva a cabo mediante dos cilindros de acero de alta presión en un banco de acero.</p> <p>En la primera etapa de funcionamiento, el almacenamiento del hidrógeno a alta presión está cerca de los 25 kg. La cascada está formada por 18 cilindros ce 6 botellas cada etapa.</p> <p><b>Dispensadores:</b> El distribuidor internacional FTI es capaz de llenar autobuses y coches a 350 o 200 bar con un interfaz de pantalla táctil para seleccionar la presión de llenado y visualizar los parámetros de funcionamiento.</p> <p>Hay un dispensador provisto de dos boquillas (WEH TK 16 y TK 25). No hay ni preenfriamiento ni interfaz de comunicación con el vehículo.</p> <p>La proporción de llenado depende de la temperatura ambiente. Si la temperatura ambiente es superior a 30°C, el dispensador suministra hidrógeno con una baja proporción de llenado con el fin de mantener la temperatura en el interior del depósito del vehículo por debajo de 85 °C. La velocidad de llenado puede variar entre 0,2 y 0,6 kg/min. La estación está controlada por un PLC que supervisa la</p>

	instalación para tener una operación segura y también registra y envía todos los parámetros de funcionamiento importantes, como presiones, temperaturas, caudales, tiempo de llenado o consumo eléctrico de manera que los resultados pueden ser utilizados para optimizar la instalación y mejorar futuros diseños de estaciones de hidrógeno.
<b>Operador</b>	
<b>Proveedor de tecnología</b>	Lurgi-IHT
<b>Más socios</b>	Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón y Gobierno de Aragón
<b>Combustible</b>	<input type="checkbox"/> LH2 <input checked="" type="checkbox"/> Turismos, CGH2 350 <input checked="" type="checkbox"/> Autobús, CGH2 350 <input checked="" type="checkbox"/> CGH2 (otros) 20 MPa
<b>Suministro de hidrógeno</b>	Electrólisis, 25 kg/día
<b>Almacenaje de hidrógeno</b>	Alta presión en cilindros de acero
<b>Contacto de la hidrogenera</b>	info@hidrogenoaragon.org
<b>Web hidrogenera</b>	<a href="http://www.hidrogenoaragon.org">www.hidrogenoaragon.org</a>



- **Hidrogenera EXPO 2008 Zaragoza.** La segunda hidrogenera de toda España se inauguró en Zaragoza en el año **2008**, en Valdespartera, en el marco de la Expo. Con un presupuesto de 300.000 euros y 2.500 metros cuadrados de superficie, su principal cometido era abastecer a autobuses y otros vehículos de hidrógeno que se utilizaban para el transporte de visitantes, entre otros usos (*Tabla 13*).

Tabla 13. Características de la Hidrogenera situada en EXPO2008 (Zaragoza).Fuente: *H<sub>2</sub> stations, 2013*.

<b>Estado</b>	En operación
<b>Fecha de comienzo</b>	16.06.2008 hasta 16.06.2016
<b>Últimos cambios</b>	Actualización 18.12.2012, funciona perfectamente
<b>Acceso público</b>	Sí
<b>Ubicación</b>	España 50012 Zaragoza Calle Centauros del Desierto, s/n Parcela 130
<b>Objetivo</b>	Abastecer a autobuses y otros vehículos de hidrógeno que se utilizaban para el transporte de los visitantes de la ExpoZaragoza 2008.
<b>Descripción</b>	Después de ExpoZaragoza 2008 esta estación proporcionará suministro durante 8 años a vehículos uso privado y uso público.
<b>Operador</b>	ZOILO RIOS
<b>Proveedor de tecnología</b>	Air Products Hydrogenics Corp.
<b>Más socios</b>	Carburos Metálicos e IDOM
<b>Combustible</b>	<input type="checkbox"/> LH <sub>2</sub> <input checked="" type="checkbox"/> Turismos, CGH <sub>2</sub> 350 <input type="checkbox"/> Turismos, CGH <sub>2</sub> 700 <input checked="" type="checkbox"/> Autobús, CGH <sub>2</sub> 350 <input checked="" type="checkbox"/> CGH <sub>2</sub> (otros) <input type="checkbox"/> Otros 20 MPa (Un dispensador con dos boquillas a 20 y 35 MPa)
<b>Suministro de hidrógeno</b>	Electrólisis, 24 kg/día; 12 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Almacenaje de hidrógeno</b>	108 kg a 42 MPa
<b>Contacto de la hidrogenera</b>	Ignacio Rios Torre irt@zoilrios.com
<b>Web hidrogenera</b>	<a href="http://www.zoilrios.com">www.zoilrios.com</a> <a href="http://www.hidrogenoaragon.org">www.hidrogenoaragon.org</a>



- **Don Quijote Hidrogenera (AJUSA). (Tabla 14)**

Tabla 14. Características de la Hidrogenera situada en AJUSA (Albacete).Fuente: *H<sub>2</sub> stations, 2013*

<b>Estado</b>	En operación
<b>Fecha de comienzo</b>	01.03.2012
<b>Últimos cambios</b>	El 26.03.2012 funcionaba correctamente
<b>Acceso público</b>	Sí
<b>Ubicación</b>	España 02006 Albacete Carretera de Ayora, km 2.2 Parque empresarial AJUSA, Calle 2
<b>Objetivo</b>	Apoyar al desarrollo del programa de vehículo de pila de combustible de AJUSA.
<b>Descripción</b>	Un dispensador con dos boquillas, TK16 (turismos) y TK25 (autobuses) según la norma SAE J 2600. La estación de hidrógeno Don Quijote es un subproyecto del proyecto Hydrogen City, con el objeto de ser una de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno de la red de estaciones española. Tiene una tecnología de llenado rápido. Se pueden llenar hasta 4 coches consecutivos costando el llenado de cada vehículo unos 5 minutos. La estación está preparada para funcionar a 700 bar.
<b>Operador</b>	AJUSA
<b>Proveedor de tecnología</b>	
<b>Más socios</b>	
<b>Combustible</b>	<input type="checkbox"/> LH2 <input checked="" type="checkbox"/> Turismos, CGH2 350 <input type="checkbox"/> Turismos, CGH2 700 <input checked="" type="checkbox"/> Autobús, CGH2 350 <input type="checkbox"/> CGH2 (otros) <input type="checkbox"/> Otros
<b>Suministro de hidrógeno</b>	Distribución de CGH2
<b>Almacenaje de hidrógeno</b>	90 kg a 420 bar
<b>Contacto de la hidrogenera</b>	th@ajusa.es
<b>Web hidrogenera</b>	<a href="http://www.ajusa.es">www.ajusa.es</a>



### - Proyecto Hércules (Sevilla). (Tabla 15)

Tabla 15. Características de la Hidrogenera situada en Sevilla. Fuente: **H<sub>2</sub> stations, 2013**

<b>Estado</b>	En operación
<b>Fecha de comienzo</b>	16.06.2010
<b>Últimos cambios</b>	29.01.2013 actualización
<b>Acceso público</b>	No
<b>Ubicación</b>	España, Andalucía 41800 Sanlúcar la Mayor, Sevilla Parcela 71, Polígono 39 Plataforma Solar Solucar, Finca Casaquemada
<b>Objetivo</b>	Demostración de producción de hidrógeno in-situ a partir de energía solar
<b>Descripción</b>	
<b>Operador</b>	Abengoa Hidrógeno
<b>Proveedor de tecnología</b>	Abengoa Hidrógeno. Instituto Nacional para la tecnología aeroespacial (INTA). Carburos Metálicos. Asociación Andaluza para la Investigación y la Industria (AICIA)
<b>Más socios</b>	Abengoa Solar New Technologies, Santana Motor, Agencia Andaluza de Energía (AAE)
<b>Combustible</b>	<input type="checkbox"/> LH <sub>2</sub> <input checked="" type="checkbox"/> Turismos, CGH <sub>2</sub> 350 <input type="checkbox"/> Turismos, CGH <sub>2</sub> 700 <input type="checkbox"/> Autobús, CGH <sub>2</sub> 350 <input type="checkbox"/> CGH <sub>2</sub> (otros) <input type="checkbox"/> Otros
<b>Suministro de hidrógeno</b>	Electrólisis in-situ con electricidad obtenida de energía solar.
<b>Almacenaje de hidrógeno</b>	1.2 m <sup>3</sup> a 220 bar y 45 °C en cilindros de gas (3 días de producción de H <sub>2</sub> a partir de energía solar)
<b>Contacto de la hidrogenera</b>	veronica.mesa@hidrogeno.abengoa.com
<b>Web hidrogenera</b>	<a href="http://www.proyectohercules.es">www.proyectohercules.es</a>



## The Hercules Project

## Partners



## Financial support



Project ref.: PS-120000-2006-1

A continuación se muestran los costes medios de inversión estimados para la infraestructura europea de H<sub>2</sub> en el período 2010/2020 de dos tipos de hidrogeneras: de hidrógeno gaseoso (CGH<sub>2</sub>) y de hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>). Se puede observar que son caros, aún más caros que la infraestructura de gas natural. En ambos casos, se desglosa el coste de la fuente energética necesaria para la obtención de hidrógeno y el coste de la infraestructura necesaria para el almacenamiento y suministro del hidrógeno. El coste de la infraestructura necesaria para el almacenamiento y suministro del hidrógeno es de 4 Millones de € (Fig. 13).

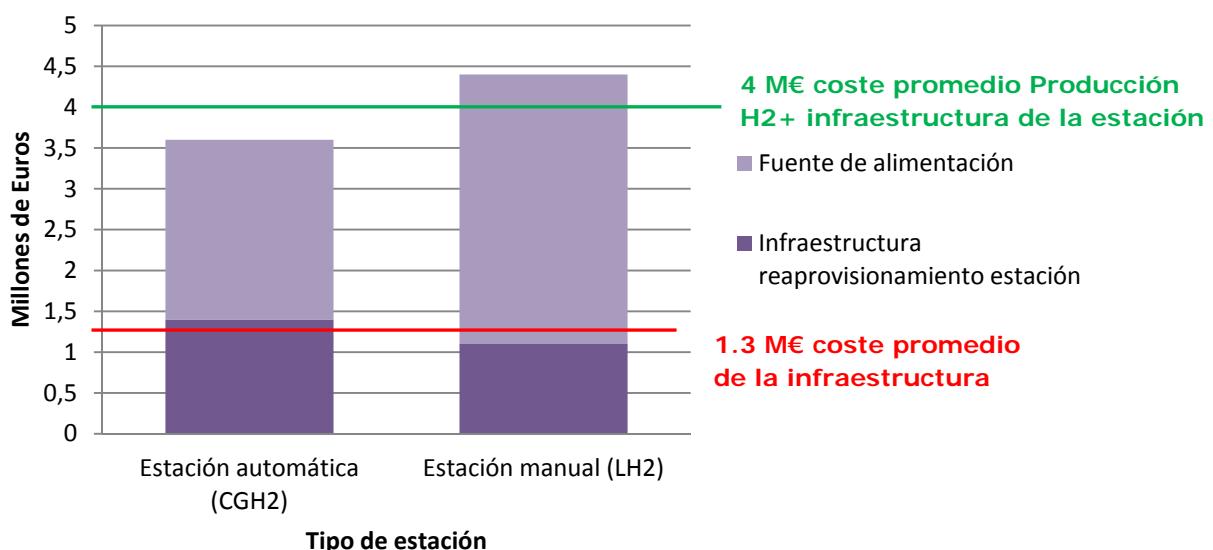


Fig. 13. Costes específicos promedio por estación de H<sub>2</sub>. Fuente: TES/LBST, 2013.

El desarrollo de estaciones de servicio de hidrógeno supondrá uno de los pasos más importantes para el uso generalizado de esta nueva fuente energética. Las zonas más idóneas para la creación de estas infraestructuras son aquéllas con una población pequeña y concentrada en el entorno de una gran ciudad, y que cuenten con importantes recursos renovables, ya que de esta forma se reduce el número de «hidrogeneras» a construir y se disminuyen los costes.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Agencia Internacional de la Energía, 2007. <http://www.iea.org/techno/essentials5.pdf>

Agencia Internacional de la Energía, 2013.  
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf>

Agnolucci Paolo, 2007. Hydrogen infrastructure for the transport sector. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 3526-3544.

Air products, 2013. [http://www.airproducts.co.uk/bulkgases/hydrogen\\_equipment.htm](http://www.airproducts.co.uk/bulkgases/hydrogen_equipment.htm)

Argonne National Laboratory, 2009 Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications.  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/cryo\\_compressed\\_auto.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/cryo_compressed_auto.pdf)

Barral Katia, Barthélémy Hervé. Hydrogen high pressure tanks storages: overview and new trends due to H2 Energy specifications and constraints. WHEC 16 / 13, 16 June 2006 .Lyon France.

Bevilacqua, Knight. Bringing fuel cell vehicles to market-scenarios and challenges with fuel alternatives. West Sacramento, CA: California Fuel Cell Partnership, 2001.

Brey J.J., Carazo A.F., Brey R. Using AHP and binary integer programming to optimize the initial distribution of hydrogen infrastructures in Andalusia. International Journal of hydrogen energy 37 (2012) 5372-5384.

California Hydrogen Highway Network (CHHN). Economic team report. West Sacramento, CA: California 2010 Hydrogen Highway Network, 2005.

DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs.

DOE, 2013 (1). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/freedomcar\\_targets\\_explanations.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/freedomcar_targets_explanations.pdf)

DOE, 2013 (2). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen\\_storage.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.html)

DOE, 2013 (3). Hydrogen Storage.

[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech\\_status.html](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech_status.html)

DOE, 2013 (4). Hydrogen Storage.

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/storage.pdf>

DOE, 2013 (5). Hydrogen Storage.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mfq2011\\_plenary\\_leavitt.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mfq2011_plenary_leavitt.pdf)

Ernst & Young. An economic analysis of various hydrogen fuelling pathways from a Canadian perspective. Ottawa, Ontario: Natural Resources Canada, 2005.

FITSA, IDAE, 2008. Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: situación y perspectivas para la automoción.

Florida Solar Energy Center, 2013.

<http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/storage.htm>

Gielen D, Simbolotti G. Prospects for hydrogen and fuel cells. París: International Energy Agency (IEA): 2005.

González García-Conde, A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Asociación Española del Hidrógeno.

<http://www.udg.edu/LinkClick.aspx?fileticket=qifUssA0Vxs%3D&tabid=8702&language=ca-ES>

H2moves, 2013.

[http://www.hylights.org/publications/reports/hyLights\\_final\\_results/H2data\\_norwegian.pdf](http://www.hylights.org/publications/reports/hyLights_final_results/H2data_norwegian.pdf)

H<sub>2</sub> stations, 2013. <http://www.netinform.net/h2/H2Stations/Default.aspx>

HyWays. HyWays: a European roadmap—assumptions and robust results from phase I report. Available at: <http://www.hyways.de>; 2006.

International Energy Agency. Hydrogen production and storage. R&D priorities and gaps, 2006.

Johnson N, Yang C, Ogden J. Build-out scenarios for implementing a regional hydrogen infrastructure. In: Proceedings for the national hydrogen association (NHA) annual conference, Long Beach, CA, March 2006.

Leiby PN, Greene DL, Bowman D, Tworek E. Systems analysis of the hydrogen transition with HyTrans. Transport Research Board of the National Academies 85th Annual Meeting CD-ROM, 2005.

López Peña, Antonio. "Análisis de sensibilidad de los parámetros que determinan la logística de distribución para el suministro de hidrógeno en automoción. Tesis doctoral de Antonio López Peña. Universidad de Zaragoza, Grupo de Transporte e Investigación Logística (GITEL) año 2008.

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Mohtadi Rana, Matsunaga Tomoya, Heung Kit, Schumacher Ray, Wicks George. Hollow Glass Microspheres as Micro Media for Complex Metal Hydrides. 2011.

Moore RB, Raman V. Hydrogen infrastructure for fuel cell transportation. Int J Hydrogen Energy 1998;23:617–20.

Mulder F, Girard J. Policy implications of the investment needs and economic viability. The Hague: SenterNovem; 2004.

Myers DB, Ariff GD, James BD, Kuhn RC. Hydrogen from renewable energy sources pathway to 10 Quads For transportation uses in 2030 to 2050. Washington, DC: The Hydrogen Program Office of Power Technologies U.S Department of Energy, 2003.

National Hydrogen Energy Roadmap. United States Department of Energy, 2002.  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national\\_h2\\_roadmap.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national_h2_roadmap.pdf)

National Research Council, National Academy of Engineering (NRC/NAE), The hydrogen economy opportunities, cost, barriers, and R&D Needs. Washington, DC: National Academies Press; 2004.

Nicholas M. Hydrogen station siting and refueling analysis using geographic information systems: a case study of Sacramento county. Master's thesis University of California Davis, Davis, California; 2004.

Odgen Joan M. Review of small stationary reformers for hydrogen production. IEA/H2/TR-02/002, 2001.

Pollet Bruno G., Stafell Iain, Shang Jin Lei. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. ELECTROCHEMICAL SCIENCE AND TECHNOLOGYState of the Art and Future. Volume 84, December 2012, Pages 235-242.

Stedt M.T., Sherif S.A., Veziroglu T.N. y Sheffield J.W. An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. I: pp. 565-576, 1998.

TES/LBST, 2013.

<http://www.hysafe.org/science/eAcademy/docs/1stesshs/presentations/HyApproval.pdf>

UNICAMP, 2013.

<http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Hidrogeno%2010-07/AGonz%C3%A1lez.pdf>

Universidad de Sevilla. Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.

US Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and The FreedromCAR and Fuel Partnership, 2009. Targets for Onboard Hydrogen Storage Systems for Light-Duty Vehicles.

[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/pdfs/targets\\_onboard\\_hydrogen\\_storage\\_explanation.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/pdfs/targets_onboard_hydrogen_storage_explanation.pdf)

Veziroglus and Sheffield J.W. An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. M.T.Syed, S.A. Sherif, T.N. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. I: pp. 565-576, 1998.

Villalonga S., Nony F., Magnier C., Yvernes J.L., Thomas C., Delmas B., Mazabraud P.. Composite 700 bar-vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage.

Wang M, Mintz M, Singh M, Stork K, Vyas V, Johnson L. Assessment of PNGV fuels infrastructure, phase 2-final report: additional capital needs and fuel cycle energy and emissions impacts. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research and Decision and Information Sciences Division, 1998.

Weinert JX. A near-term economic analysis of hydrogen fueling stations. Davis: Institute of Transportation Studies, University of California 2005.

Wilson John R. Hydrogen storage technologies, for transportation, auxiliary power generation and military applications. July 2011.

Yang C, Ogden J. Analyzing natural gas based hydrogen infrastructure—optimizing transitions from distributed to centralized H<sub>2</sub> production. In: Proceedings of National Hydrogen Association Conference. Washington, D.C., March 29–April 1, 2005.

**ANEXO V. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE  
COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y  
CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.**

**ANEXO V. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.**

<b>5.1. Análisis comparativo de distintas características de los vehículos.</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1.1. Masa del vehículo.</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1.2. Volumen del sistema de almacenamiento de energía.</b> .....	<b>9</b>
<b>5.1.3. Tiempo de repostaje.</b> .....	<b>10</b>
<b>5.2. Balance de emisiones.</b> .....	<b>11</b>
<b>5.3. Balance energético.</b> .....	<b>14</b>
<b>5.4. Balance del grado de desarrollo tecnológico y de las infraestructuras.</b> .....	<b>16</b>
<b>5.5. Análisis económico social.</b> .....	<b>17</b>
<b>5.6. Estudio de disponibilidad de los distintos sistemas en el mercado.</b> .....	<b>21</b>
<b>5.7 Comparativa económica de los distintos tipos vehículos.</b> .....	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>35</b>

## **ANEXO V. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE CON EL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y CON EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.**

Para alcanzar simultáneamente los objetivos de reducir en un 80% los gases de efecto invernadero por debajo de los niveles de 1990 en el sector del transporte de vehículos ligeros, eliminar casi toda la dependencia del combustible importado para el transporte y eliminar la mayoría de la contaminación, la mayor parte de los vehículos ligeros deberían convertirse en vehículos completamente eléctricos.

Los vehículos completamente eléctricos pueden ser impulsados bien por baterías (o ultracondensadores) o bien por pilas de combustibles con baterías.

En este análisis comparativo se van a analizar distintos tipos de vehículos (*Tabla 1*), de los cuales se presenta una breve descripción a continuación:

- **Vehículos eléctricos (BEVs):** Se refiere a los vehículos que utilizan energía eléctrica para su propulsión, utilizando para ello un motor eléctrico alimentado por un conjunto de baterías en lugar de un motor de combustión alimentado por un depósito de combustible.

Debido a la baja densidad de energía específica de las baterías (principalmente baterías de níquel-hidruros de metal (Ni-MH), o baterías plomo-ácido), la autonomía de este tipo de vehículos es limitada (unos 60-100 km de recorrido por recarga). No obstante, los últimos desarrollos de las baterías Li-Ion, están relanzando el concepto de los vehículos eléctricos de batería.

- **Vehículos eléctricos híbridos (HEVs):** Vehículos que combinan un motor eléctrico, normalmente alimentado con baterías, y un motor de combustión interna (MCI) convencional.

En función de su principio de funcionamiento pueden ser: híbridos en serie, híbridos en paralelo o configuración combinada.

Los vehículos eléctricos híbridos en serie no tienen conexión mecánica directa entre el motor de combustión interna y las ruedas. El vehículo es impulsado por el motor eléctrico gracias a la electricidad generada por el motor de combustión que acciona un generador eléctrico. La batería actúa como acumulador de electricidad sobrante, y cuando está totalmente cargada permite la desconexión temporal del MCI de forma que el vehículo puede impulsarse momentáneamente de manera eléctrica.

En el caso de los vehículos eléctricos híbridos en paralelo, el MCI y el motor eléctrico funcionan a la vez para impulsar al vehículo.

Y por último, si hay configuración combinada, el MCI carga las baterías y contribuye a la propulsión actuando sobre las ruedas.

Los vehículos eléctricos híbridos también se pueden clasificar en semihíbridos (cuando el motor eléctrico se utiliza para ayudar al motor de combustión a traccionar el vehículo y además, el vehículo es capaz de recuperar parte de la energía cinética durante las frenadas mediante un freno eléctrico que actúa como generador de electricidad, híbridos puros (cuando además de lo que pueden hacer los semihíbridos si el vehículo puede circular de forma voluntaria

utilizando solo el motor eléctrico (motor térmico apagado) o híbridos enchufables “plug-in hybrid” (PHEVs) (cuando están preparados para recargar las baterías enchufándolos a la red eléctrica, lo que les permite un funcionamiento más prolongado en modo exclusivamente eléctrico).

Tabla 1. Clasificación de los vehículos según su funcionamiento híbrido. Fuente: FITSA, IDAE, 2008.

Si...	Ese vehículo es un...			
	Vehículo Convencional	Semihíbrido	Híbrido puro	Híbrido enchufable
Detiene automáticamente el motor de combustión en paradas				
Utiliza frenado regenerativo y funciona por encima de 60 voltios				
Utiliza un motor eléctrico para ayudar al motor convencional				
Puede funcionar a veces utilizando sólo el motor eléctrico				
Recarga las baterías utilizando electricidad de la red y tiene una autonomía de al menos 32 km con electricidad				

- **Vehículos de pila de combustible (FCEVs).** El hidrógeno como combustible en la automoción tiene dos aplicaciones fundamentales: las **pilas de combustible** y los  **motores de combustión interna alternativos**. En ambas aplicaciones este combustible se combina con el oxígeno del aire, generando electricidad en el caso de las pilas de combustible y energía mecánica en el caso de los motores térmicos.  
La pila de combustible convierte el hidrógeno y el oxígeno en agua, generando electricidad en dicha combinación química. En el vehículo, el hidrógeno puede estar almacenado en un depósito, o se puede obtener a partir de otro combustible en un reformador instalado a bordo. El oxígeno se obtiene generalmente del aire. Si se utiliza hidrógeno puro esta tecnología emite a la atmósfera únicamente vapor de agua, lo que supone grandes beneficios medioambientales. Sin embargo, es necesario reducir los costes de las pilas de combustible para que se puedan utilizar, por ejemplo disminuyéndose la cantidad de metales preciosos (como platino o paladio) utilizados como catalizadores de la combinación química del hidrógeno con el oxígeno.  
La opinión general del sector es que a largo plazo se impondrán las pilas de combustible frente a los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, básicamente porque los primeros son más eficientes que los segundos.
- **Vehículos de motor de combustión interna de hidrógeno:** El hidrógeno también puede utilizarse como carburante en los motores de combustión

interna alternativos de encendido provocado (categoría de motores a la cual pertenecen los motores de gasolina convencionales). Esta tecnología es menos eficiente energéticamente que las pilas de combustible, pero tiene la ventaja de ser una tecnología sobradamente probada.

Algunos fabricantes de vehículos piensan que los motores térmicos alternativos alimentados con hidrógeno ayudarán a dar el salto hacia el futuro, el cual, sin embargo, estará dominado por las pilas de combustible. Dicho salto se produciría al aumentar la demanda de hidrógeno para su uso como combustible y, como consecuencia, al desarrollarse una infraestructura de estaciones de suministro.

- **Vehículos de motor de combustión interna alternativa de encendido provocado** (utilizando gasolina como combustible).

Si se analizan las ventajas (+) e inconvenientes (-) de cada uno de los sistemas de propulsión que se han explicado anteriormente se concluye lo siguiente (*Tabla 2*):

*Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de los distintos sistemas de propulsión alternativos. Fuente: FITSA, IDAE, 2008.*

Nuevos sistemas de propulsión	Ventajas (+) e inconvenientes (-)
Sistemas convencionales (motores de combustión interna)	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Coste muy competitivo</li> <li>+ Desarrollo tecnológico muy elevado: alta fiabilidad</li> <li>+ Amplia red de suministro</li> <li>+ Autonomía y prestaciones</li> <li>- Necesidad de modificaciones para utilizar combustibles alternativos</li> <li>- Menor eficiencia que otros sistemas de propulsión (como híbridos, eléctricos, pila de combustible...)</li> </ul>
Vehículos híbridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Reducción del consumo, de las emisiones contaminantes y de las emisiones de CO<sub>2</sub></li> <li>+ Recuperación de energía en retenciones y frenadas</li> <li>+ Mayor autonomía que un vehículo eléctrico simple</li> <li>+ Mejor funcionamiento en recorridos cortos que un vehículo convencional. Consumo muy inferior en recorridos cortos</li> <li>+ El motor térmico tiene una potencia más ajustada al uso habitual del vehículo</li> <li>- Mayor peso que un coche convencional</li> <li>- Mayor complejidad</li> <li>- Escasa oferta de fabricantes</li> <li>- Precio de adquisición elevado</li> </ul>
Vehículos eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Emisiones locales nulas</li> <li>+ Apenas emiten ruido</li> <li>+ Pueden recuperar parte de la energía cinética en retenciones y frenadas</li> <li>- Autonomía reducida limitada por la capacidad de la batería</li> <li>- Escasa oferta de vehículos</li> <li>- Altos costes iniciales de los vehículos</li> <li>- Se requiere una infraestructura de suministro de electricidad</li> </ul>
Vehículos impulsados por pila de combustible	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Emisiones locales nulas</li> <li>+ Gran eficiencia de las pilas de combustible</li> <li>- Oferta de vehículos limitada a prototipos</li> <li>- Necesidad de estaciones de reabastecimiento</li> <li>- Precio elevado de las pilas de combustible</li> <li>- Tecnología de almacenamiento del hidrógeno compleja</li> </ul>

Existen estudios (**Thomas CE (2), 2009**) que mediante una simulación dinámica han comparado los beneficios sociales que se obtendrían al reemplazar los automóviles convencionales de gasolina por los vehículos que son parcialmente eléctricos, incluyendo los vehículos híbridos, los vehículos híbridos “enchufables” (plug-in) impulsados por gasolina, hidrógeno y etanol, y los vehículos totalmente eléctricos alimentados exclusivamente por baterías o por pilas de combustible de hidrógeno. Esta simulación compara los beneficios sociales obtenidos, año por año, con un horizonte de 100 años de cada una de las combinaciones de tipo de vehículo y tipo de combustible respecto a los vehículos convencionales.

Los vehículos que siguen utilizando el motor de combustión interna no pueden alcanzar los objetivos establecidos, incluso si son alimentados con biocombustibles. Por lo que existen dos opciones principales para los vehículos completamente eléctricos: las baterías o las pilas de combustible. Para vehículos con una autonomía superior a 160 km, las pilas de combustible son mejor opción que las baterías en cuanto a masa, volumen, coste inicial de la reducción de gases efecto invernadero, tiempo de repostaje, eficiencia energética “pozo a rueda” utilizando gas natural o biomasa como fuente, y costes de ciclo de vida.

Los vehículos eléctricos con pila de combustible son mejores que los vehículos eléctricos con batería de Ión-Litio, ya que los vehículos eléctricos con pila de combustible (**Thomas CE (2), 2009**):

- Pesan menos.
- La pila de combustible ocupa menos que la batería.
- Generan menos gases invernadero.
- Cuestan menos (inferior coste del vehículo e inferior coste de ciclo de vida)
- Necesita menos tiempo para repostar.

Los vehículos eléctricos tienen tres ventajas si se comparan con los vehículos eléctricos con pila de combustible (**Thomas CE (2), 2009**):

- Coste del combustible por kilómetro inferior.
- Menor consumo de energía eólica o solar por kilómetro recorrido.
- Inicialmente tiene mejor capacidad para acceder a repostar ya que actualmente hay más puntos de repostaje.

Se llega a la conclusión de que el vehículo de pila de combustible es capaz de proporcionar la autonomía, el espacio para los pasajeros y para el maletero y los tiempos de repostaje exigidos por los conductores a un precio asequible. Los vehículos completamente eléctricos de batería podrían aplicarse a vehículos urbanos y vehículos interurbanos que realicen trayectos cortos. Se requieren grandes avances en las tecnologías de las baterías para mejorar los vehículos, en concreto, en lo que se refiere a tiempos de recarga. La mayoría de los conductores no aceptan más de 15-20 minutos de tiempo de recarga en un viaje de larga distancia con vehículo eléctrico, mientras que los vehículos de pila de combustible pueden ser reabastecidos en 3-5 minutos (**Thomas CE (2), 2009**).

En la siguiente tabla (*Tabla 3*) se muestra un resumen en el que se comparan las características de un vehículo de pila de combustible con las características de un vehículo eléctrico de batería avanzada para unas autonomías de 320 y 480 kilómetros.

*Tabla 3. Resumen de las características de un vehículo eléctrico de pila de combustible comparadas con las características de un vehículo de batería avanzado para el caso de una autonomía de 320 y 480 km. Fuente: (Thomas CE (2), 2009).*

	320 km (200 miles) Range			480 km (300 miles) Range		
	Fuel Cell EV	Battery EV	Ratio BEV/FCEV	Fuel Cell EV	Battery EV	Ratio BEV/FCEV
Vehicle Weight (kg)	1,259	1,648	1.31	1,280	2,214	1.73
Storage Volume (Liters)	70 MPa 35 MPa	179 382	2.13 1.00	224 295	680	3.04 2.31
Greenhouse Gases (g/km)	180	285	1.58	182	339	1.86
Incremental Vehicle Cost (\$)	2,830	10,200	3.60	2,237	12,119	5.42
Fuel Cost per km (cents/km) <sup>a</sup>	3.36	1.63	0.48	3.40	1.94	0.57
Fueling Cost per Vehicle (\$)	955	878	0.92	955	2150	2.25
Incremental Life Cycle Cost (\$)	13380	16187	1.21	14267	27734	1.94
Natural Gas Req'd (MBTU)	NG CC <sup>b</sup> NG CT	0.63 0.95	1.19 1.79	0.81	1.15	1.42
Biomass Req'd (MBTU)	0.82	1.09	1.33	1.24	1.98	1.60
Wind Electricit Req'd (kWh)	164.9	90	0.55	250.1	165.4	0.66
Wind + Vehicle Incremental Cost (\$)	7,712	12,041	1.56	7,510	22,215	2.96
Level 1 <sup>c</sup>	43	645		78	780	
Fueling Time (hours)	Level II <sup>d</sup>	0.07	11	165	0.10	19
	Level III <sup>e</sup>	0.55	8.25		1	10.00

a) off-peak electricity = 6 cents/kWh; hydrogen = \$3.30/kg

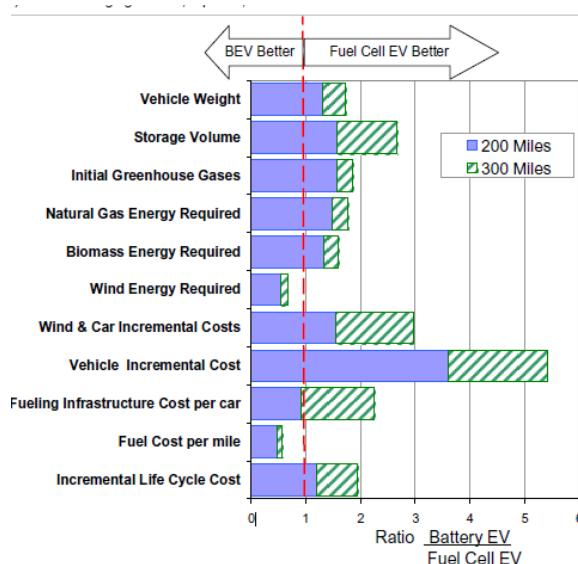
b) NG CC = natural gas combined cycle; NG CT = natural gas combustion turbine

c) Level 1 residential charging = 120V, 20A single phase, 1.9 kW

d) Level II charging = 240V, 40A, single phase, 7.7 kW

e) Level III charging = 480V, 3-phase, 150 kW

Para comparar ambos modelos de vehículo se ha calculado un ratio (Vehículo eléctrico de batería/Vehículo eléctrico de pila de combustible). En la siguiente figura (*Fig. 1*) se muestra el valor de este ratio para vehículos de una autonomía de 320 km y para vehículos de una autonomía de 480 km. En esta figura, valores mayores de 1 indican que es mejor el vehículo de pila de combustible y para valores menores de 1 es mejor el vehículo de batería.



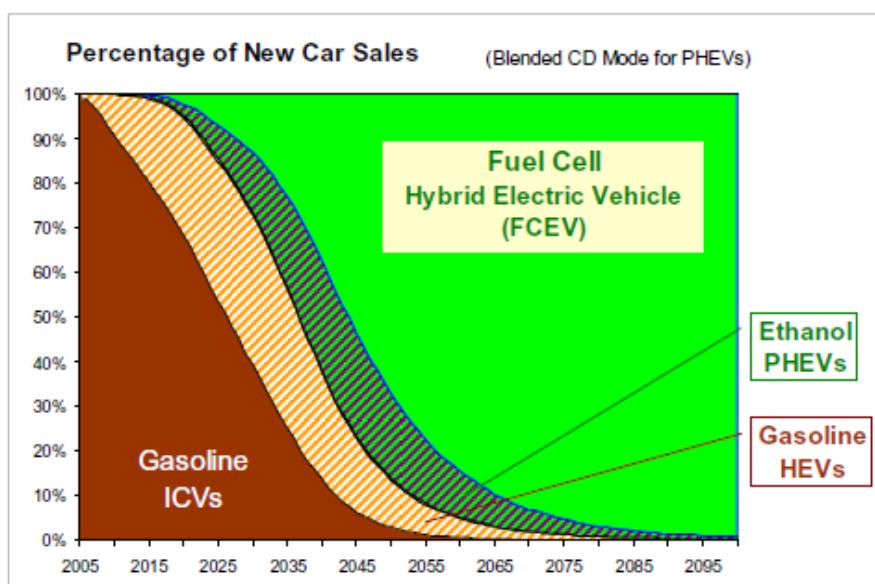
*Fig.1. Ratio de las características de un vehículo eléctrico de batería avanzado dividido por las características de un vehículo eléctrico de pila de combustible, para el caso de una autonomía de 320 km (200 millas) y para el caso de 480 km (300 millas). Asumiendo un promedio de la red mixta de US en el período 2010-2020 y que todo el hidrógeno se obtiene a partir de gas natural. Fuente: (Thomas CE (2), 2009).*

Las ventajas de los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEVs) son mayores si el vehículo tiene una autonomía de 480 km (300 millas), pero para el caso del vehículo con una autonomía de 320 km el FCEV también tiene propiedades superiores al vehículo eléctrico de batería (BEV).

Estas ventajas son la explicación de por qué la mayoría de los fabricantes de vehículos se estén centrándose en los FCEV. La mayoría de constructores están considerando los vehículos híbridos “enchufables” ya que requieren unas baterías de características menos estrictas que los vehículos completamente eléctricos y otros constructores están desarrollando vehículos eléctricos para núcleo urbano.

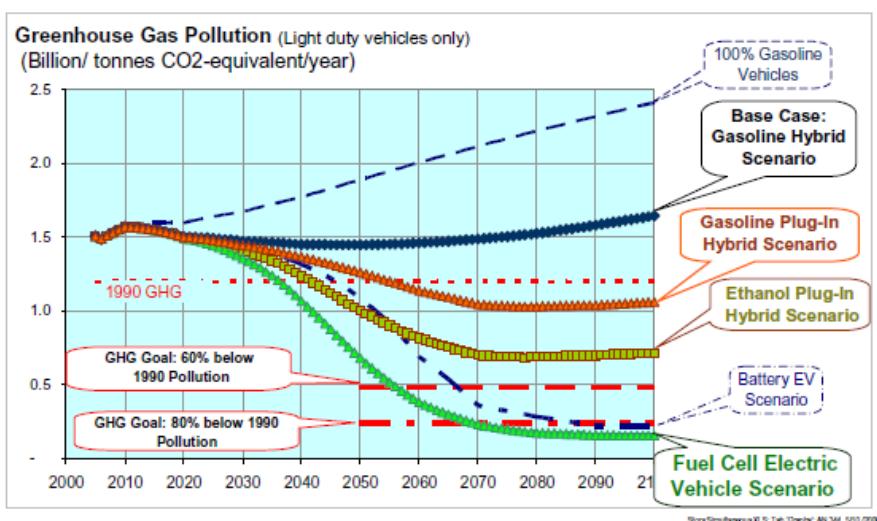
Por otro lado un informe del NRC (National Research Council) del año 2008 (**Ramage, 2008**) concluye que los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) serán la mejor opción para reducir las emisiones de gases efecto invernadero y para reducir el consumo de combustibles fósiles.

Como se puede ver en la siguiente figura (*Fig.2*), los vehículos de gasolina, los vehículos eléctricos híbridos y los vehículos eléctricos híbridos propulsados por etanol dominan el mercado de venta de los vehículos nuevos durante la primera mitad del siglo 21, con los vehículos propulsados por hidrógeno alcanzando la mitad de las ventas a mediados de dicho siglo.



*Fig.2. Porcentaje de vehículos nuevos vendidos durante el siglo 21 en el escenario de los vehículos eléctricos de pila de combustible propulsados con hidrógeno (FCEV), mostrando los vehículos con motor de combustión interna de gasolina (ICVs), seguidos de los vehículos eléctricos híbridos propulsados por gasolina (HEVs), los vehículos eléctricos híbridos plug-in propulsados por etanol (PHEVs) y finalmente los vehículos eléctricos de pila de combustible propulsados por hidrógeno. Fuente: (Thomas CE (2), 2009).*

Como se muestra en la *Fig.3* los HEV's y los PHEV's reducen las emisiones de gas de efecto invernadero, pero estos vehículos que todavía utilizan los motores de combustión interna no serán adecuados para conseguir reducir la emisión de gases invernadero en un 80%, respecto a los niveles del año 1990. Solamente introduciendo gradualmente los vehículos de pila de combustible o de batería se podrán reducir las emisiones de gas efecto invernadero.



*Fig.3.* Gases de efecto invernadero emitidos para diferentes alternativas de vehículos durante el siglo 21 para la flota de vehículos ligeros de US, asumiendo que la red eléctrica y la producción de hidrógeno reducen su huella de carbono en el tiempo (EV: Vehículo eléctrico). Fuente: (**Thomas CE (2), 2009**).

## 5.1. Análisis comparativo de distintas características de los vehículos.

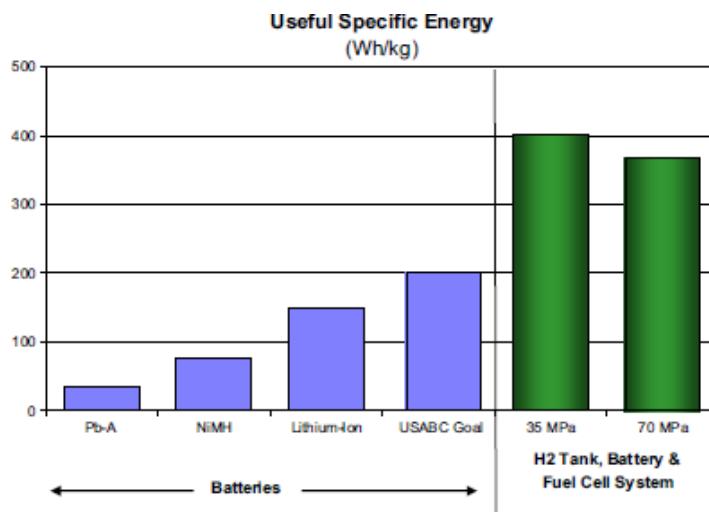
### 5.1.1. Masa del vehículo.

Para analizar la influencia de la masa del vehículo, en la siguiente figura (*Fig.4*) se muestra la energía específica útil (energía por unidad de masa) de las baterías de acido-plomo (Pb-A), de las baterías metal híbrido- Níquel (NiMH), de las baterías Ion-Litio (Li-Ion) y de las baterías US ABC (Advanced Battery Consortium) con la energía específica de un sistema de pila de combustible PEM que incluye tanques de almacenaje de hidrógeno comprimido. En dicha gráfica se muestran dos presiones de hidrógeno: 35 MPa (350 bar o 5000 psi) y 70 MPa (700 bar o 10.000 psi) con tanques de fibra-composite. Hay que tener en cuenta que el tanque de 70 MPa pesa más que el tanque de 35 MPa porque requiere mayor fibra para proporcionar la presión necesaria (**Thomas CE (2), 2009**).

La energía que se gráfica (*Fig.4*) es la energía útil entregada al motor y no la energía total almacenada. Para el caso del hidrógeno, se calcula solamente la energía eléctrica que sale del sistema de pila de combustible, que es aproximadamente el 52% del poder calorífico inferior PCI del hidrógeno almacenado en los tanques de gas comprimido, como promedio de un ciclo de conducción agresiva.

La masa considerada en el cálculo de la energía específica incluye los tanques de hidrógeno, una batería para capturar la frenada regenerativa y la aceleración, la pila de combustible y los sistemas auxiliares.

Para el caso de las baterías solamente se incluye la energía alimentada al motor, y no el total de la energía almacenada en la batería. Y la masa utilizada para calcular la energía específica incluye los componentes del sistema de batería (**Thomas CE (2), 2009**).



*Fig.4 Comparación de la energía específica útil (energía por unidad de masa) de los sistemas de pila de combustible y de varios tipos de baterías. Fuente: (Thomas CE (2), 2009).*

Se observa que una pila de combustible alimentada por Hidrógeno comprimido puede proporcionar electricidad a un motor de tracción de un vehículo con una energía por unidad de masa (Wh/kg) cinco veces mayor que las baterías actuales de Metal híbrido-Niquel utilizadas en la mayoría de vehículos híbridos de gasolina, y dos veces más que las baterías Ion-Litio. Por lo tanto se concluye que los vehículos eléctricos con batería deben ser más pesados que los vehículos de pila de combustible para una autonomía dada, tal como se muestra en la *Fig.5* (basado en un sedan de cinco pasajeros, FCEV con una autonomía de 560 km con una masa de 1280 kg).

El aumento de masa del vehículo de pila de combustible es insignificante ya que para ampliar la autonomía del vehículo los depósitos de hidrógeno son un poco más grandes lo que supone un ligero aumento de peso, mientras que la masa de las baterías del vehículo eléctrico aumentan significativamente para aumentar la autonomía. El crecimiento del peso no es lineal ya que cada kg extra de batería supone un incremento de la masa estructura, frenos más pesados, un motor de tracción más grande y todo esto conlleva la necesidad de una batería mayor.

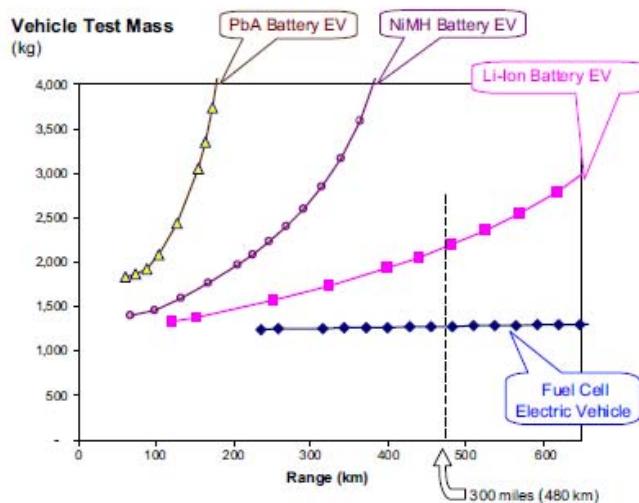


Fig.5. Masa calculada para el caso de vehículos de pila de combustible y vehículos eléctricos de batería en función de la autonomía del vehículo. El tren de potencia de todos los vehículos se ajustó para proporcionar una aceleración de 0 a 97 km/h en un tiempo de 10 s. Fuente: (Thomas CE (2), 2009).

### 5.1.2. Volumen del sistema de almacenamiento de energía.

Los tanques de hidrógeno comprimido en los vehículos de pila de combustible ocupan más espacio que el depósito de gasolina, pero estos tanques más el sistema de pila de combustible ocupan menos espacio que las baterías por unidad de energía útil transmitida al motor.

En la siguiente figura (Fig.6) se compara el volumen de almacenamiento total necesario para el caso de los tanques de hidrógeno más el sistema de pila de combustible con las baterías, en función de la autonomía del vehículo.

Ya que los vehículos eléctricos de batería pesan más que los FCEV para autonomías mayores a 80 km, un vehículo eléctrico de batería con elevada autonomía necesita más almacenaje de energía a bordo para viajar una distancia dada, necesitando más espacio en el vehículo.

Un vehículo eléctrico con una batería Ión-Litio podría alcanzar entre 400 y 480 km, pero estas baterías ocuparían entre 450 y 600 litros de espacio (equivalente a un depósito de gasolina de 454 a 605 litros). La pila de combustible más los depósitos de almacenaje de hidrógeno ocuparían aproximadamente la mitad de este espacio.

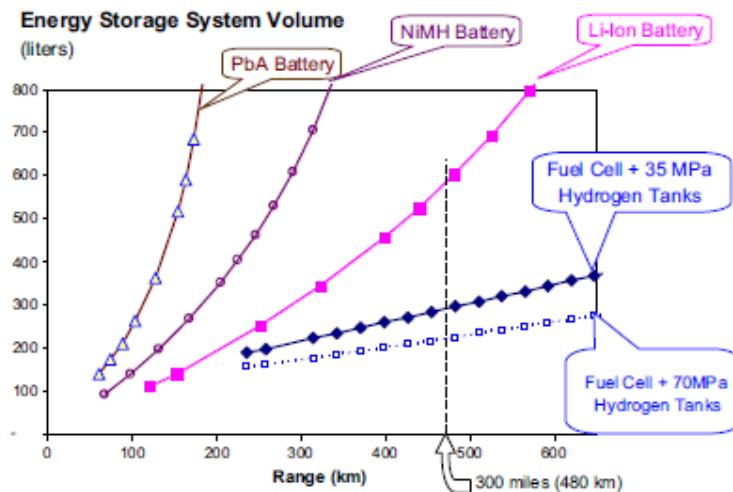


Fig.6. Volumen de almacenamiento de hidrógeno calculado más el sistema de pila de combustible comparado con el espacio requerido por las baterías en función de la autonomía del vehículo (la pila de combustible se incluye en el volumen de almacenamiento ya que el depósito de hidrógeno más el sistema de pila de combustible son necesarios para desempeñar la función de la batería eléctrica). Fuente: (Thomas CE (2), 2009).

### 5.1.3. Tiempo de repostaje.

El tiempo de carga de las baterías de todos los vehículos eléctricos es bastante elevado. Las empresas constructoras de baterías van a diseñar y fabricar baterías que tengan tiempos de carga cortos sin sobrecalentar las células de la batería. Pero incluso construyendo baterías de tiempo de carga reducido, el suministro de electricidad puede limitar el tiempo de carga de las baterías. Los circuitos eléctricos residenciales están limitados a menos de 2 kW de potencia para un circuito de 120 Voltios y 20 Amperios (Nivel de carga 1) y 8 kW para un circuito de 240 Voltios y 40 Amperios, circuitos monofásicos (Nivel de carga 2) (**Thomas CE(2), 2009**).

Por ejemplo, un vehículo eléctrico de 5 pasajeros diseñado para tener una autonomía de 320 km, necesitará 82 kWh de energía a partir de la toma de corriente eléctrica (de los cuales se almacenan 74 kWh en la batería después de tener en cuenta las pérdidas). Un nivel de carga 1 residencial, requeriría más de 42 horas para cargar totalmente un vehículo eléctrico de batería con una autonomía de 320 km y en un circuito de nivel 2 necesitaría al menos 11 horas (estos cálculos de tiempo de carga se han realizado suponiendo una potencia constante, pero los tiempos de carga serán mayores teniendo en cuenta un perfil de carga variable) (**Thomas CE(2), 2009**).

Circuitos de carga de mayor potencia son viables en un campo comercial. Un nivel de carga más rápido puede proporcionar de 60 a 150 kW de potencia. Pero incluso en este caso, la carga costaría de 36 minutos a 1,4 horas para el caso de un vehículo de batería de una autonomía de 320 km, y de 1 a 2,5 horas para cargar un vehículo de batería Ión-Litio con una autonomía de 480 km (**Thomas CE(2), 2009**).

Los tiempos de carga mínimos se muestran en la siguiente tabla (*Tabla 4*) para el caso de vehículos eléctricos de batería con una autonomía amplia.

Tabla 4. Tiempos de repostaje estimados para el caso de vehículos de batería y para el caso de vehículos de pila de combustible. Fuente: (**Thomas CE (2), 2009**).

Vehicle Range (km)	Energy Required from Grid (kWh)	Battery Electric Vehicles			Fuel Cell EVs	
		Level I Charging Time (hours)	Level II Charging Time (hours)	Level III Charging Time (hours)	Hydrogen Tank Filling Time (hours)	
241	56	120V, 20A 1.9 kW	240 V, 40A 7.7 kW	480V, 3φ 60 kW 150 kW	0.4	0.08
322	82	42.7	10.68	1.4	0.55	0.10
483	149	77.6	19.40	2.5	0.99	0.15

Resumiendo, los BEVs tienen una autonomía menor que los FCEVs, PHEVs y ICEs (vehículos de motor de combustión interna): de media, un BEV de segmento medio con una carga máxima de batería no puede recorrer más de 150 km a 120 km/h en autopista. Los tiempos de recarga también son mayores, 6-8 horas utilizando un equipo de carga normal. Los FCEVs con un rendimiento de conducción similar, tienen una autonomía entorno a 600 km y un tiempo de recarga inferior a 5 minutos, comparable con los vehículos de motor de combustión interna (**McKinsey & Company, 2011**).

## 5.2. Balance de emisiones.

En la siguiente gráfica (*Fig.7*) se muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> de diferentes combustibles alternativos y sistemas de propulsión. Para ello se lleva a cabo un análisis del ciclo completo del “pozo a la rueda” (well to wheels), estableciendo como referencia para dicho análisis las emisiones medias producidas por los vehículos de gasolina en el año 2002.

Viendo la *Fig.7*, de este análisis se concluye a nivel medioambiental que:

- Los vehículos actuales de gasolina y diesel son más limpios que los vehículos establecidos de referencia (vehículos de gasolina del año 2002), es decir, tienen un nivel de emisiones CO<sub>2</sub> más reducido.
- Los vehículos eléctricos producen emisiones nulas en el tubo de escape. Sin embargo, el análisis completo de los beneficios medioambientales de este tipo de vehículos también debe considerar las emisiones asociadas a la producción y suministro de la electricidad utilizada para recargar las baterías.
- Los vehículos híbridos producen menos emisiones de CO<sub>2</sub> que la mayoría de los automóviles con motor de combustión interna disponibles en el mercado. Si se consideran las demás emisiones reguladas (CO, HC, NO<sub>x</sub> y partículas), los vehículos híbridos también reducen significativamente estas emisiones.
- Los vehículos alimentados con hidrógeno tienen emisiones nulas de CO<sub>2</sub> en el punto de utilización (en el caso de los vehículos de pila de combustible) o muy bajas (en el caso de los vehículos con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno). En este segundo caso, las únicas emisiones que se producen son cantidades muy reducidas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). A largo plazo, se espera y desea que se produzca hidrógeno a partir de energías renovables.

Como se puede observar en la siguiente figura (Fig.7), si se utiliza una fuente de energía renovable como la eólica, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es muy importante. Mientras que si el hidrógeno se obtiene mediante reformado del gas natural, la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> ya no es tan significativa. Aunque, en este último caso a pesar de ser más desfavorable, las emisiones de CO<sub>2</sub> siguen siendo inferiores que las que se producirían con la utilización directa del gas natural en motores convencionales (ello se debe a que la pila de combustible es más eficiente que el motor convencional de combustión).

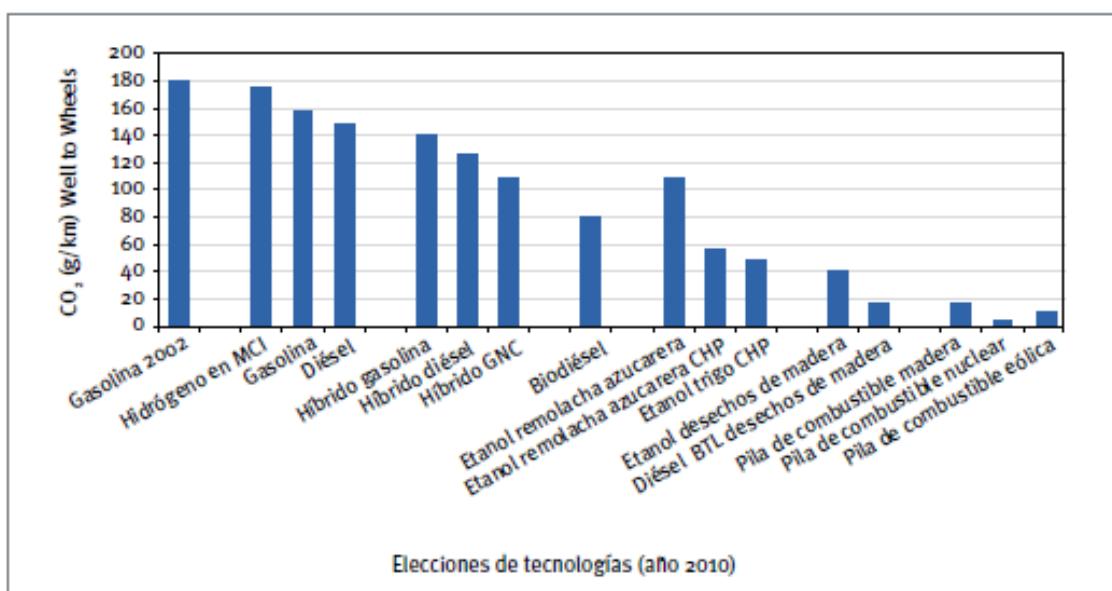


Fig.7. Emisiones de CO<sub>2</sub> de las diferentes combinaciones de combustible y sistemas de propulsión (g/km). Fuente: **FITSA, IDAE, 2008.**

Si se compara un vehículo de pila de combustible con un vehículo eléctrico de batería se concluye que el aumento de la masa de los vehículos eléctricos mediante la adición de baterías para alcanzar un rango razonable de combustible hace aumentar el consumo ya que el vehículo es más pesado y consecuentemente la emisión de gases invernadero es mayor.

Por ejemplo, un vehículo eléctrico con batería de PbA con una autonomía de 100 a 110 km generará más gases de efecto invernadero que la versión de gasolina del mismo vehículo (**Thomas CE (2), 2009.**)

Los vehículos de pila de combustible que funcionan con hidrógeno obtenido a partir de gas natural alcanzan una autonomía de 480-560 km. Las versiones de vehículos de gasolina analizados emiten 550 g CO<sub>2</sub>/milla (341 g CO<sub>2</sub>/km), por lo que este tipo de vehículos reducirían en un 47% las emisiones de gases efecto invernadero si se compara con los vehículos de gasolina (**Thomas CE (2), 2009.**)

El análisis de eficiencia del ciclo completo “del pozo a la rueda” o en inglés, “well to wheel”, muestra que los vehículos eléctricos tienen una mayor eficiencia que los vehículos de motor de combustión interna.

Debido a los límites de capacidad de la batería y a la autonomía de conducción (actualmente 100-200 km para un vehículo medio) y el tiempo de recarga actual es de varias horas, los BEVs son apropiados para vehículos pequeños y para recorridos cortos, por ejemplo conducción urbana (incluyendo los nuevos modelos de transporte tales como compartir coche). Con una autonomía comparable a los vehículos de motor de combustión interna, los FCEVs son la solución mejor para vehículos medios/grandes y recorridos largos. Este segmento de vehículos representan el 50% del total y el 75% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo tanto reemplazar un vehículo con motor de combustión interna por un FCEV consigue una elevada reducción de CO<sub>2</sub> (**Thomas CE (2), 2009**).

En el estudio llevado a cabo por McKinsey & Company (**McKinsey & Company, 2011**) también se concluye que los BEVs, PHEVs y FCEVs tienen el potencial necesario para reducir de manera importante las emisiones de CO<sub>2</sub> y las emisiones locales. Siendo la tecnología de BEVs idónea para vehículos pequeños y para recorridos cortos (teniendo en cuenta las limitaciones de las baterías y la autonomía (actualmente 100-200 km para vehículos de segmento medio, para vehículos del segmento C/D dicha autonomía se incrementa a 150-250 km)), mientras que la tecnología FCEVs es más apropiada para vehículos medios/grandes y para recorridos largos. Los PHEVs pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> si se comparan con los motores de combustión interna en viajes cortos o usando biofueles.

Los vehículos eléctricos (BEVs, FCEVs y PHEVs en conducción eléctrica) pueden ser alimentados por una amplia variedad de fuentes de energía primaria, reduciendo de esta manera la dependencia del petróleo y mejorando la seguridad del suministro de energía.

La mayoría de los avances obtenidos en Europa en la reducción de las emisiones contaminante se han conseguido gracias a las sucesivas normativas europeas anticontaminantes “Euro” y de su progresiva evolución hacia límites de contaminación cada vez más restrictivos.

En el año 2000, la Comisión Europea y los fabricantes europeos de automóviles llegaron al acuerdo de que los vehículos vendidos a partir del 2008 no debían superar la emisión de 140 gramos de CO<sub>2</sub>/km recorrido. Debido al incumplimiento de este acuerdo, en 2007 se propuso una nueva estrategia para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (125 gr de CO<sub>2</sub>/km en el año 2015) (**Parlamento Europeo, 2013**).

Por otro lado, el plan de acción de la Unión Europea para el fomento de los combustibles alternativos y los biocarburantes en el transporte por carretera concentra sus medidas y acciones en la promoción de las tres opciones que, en el año 2000, parecían poseer un mayor potencial:

- A corto plazo, los biocarburantes.
- A medio plazo, el gas natural.
- A largo plazo, el hidrógeno y las pilas de combustible.

Según la Comisión Europea, la combinación de las tres opciones anteriores permitiría en 2020 sustituir el 20% de todos los combustibles tradicionales utilizados en el sector del transporte por carretera en Europa (**Ciemat, 2013**).

### 5.3. Balance energético.

En este apartado se lleva a cabo un análisis comparativo del consumo de energía asociado a los diferentes carburantes y sistemas de propulsión, asignando al consumo de energía de los vehículos de gasolina en 2002 el valor de referencia “100”. En este análisis se tiene en cuenta la energía consumida en el proceso completo: en la obtención del combustible (materia prima), en su transformación en combustible (refinado y producido), en el transporte, distribución y venta del mismo y en el uso final del combustible en los vehículos. Este análisis se conoce como ciclo completo del combustible ó análisis “pozo-a-ruedas” (“well-to-wheels”). Este tipo de análisis tiene en cuenta la eficiencia de la producción del combustible, pozo-a-tanque (well-to-tank), y la eficiencia propia del vehículo (tanque-a-ruedas).

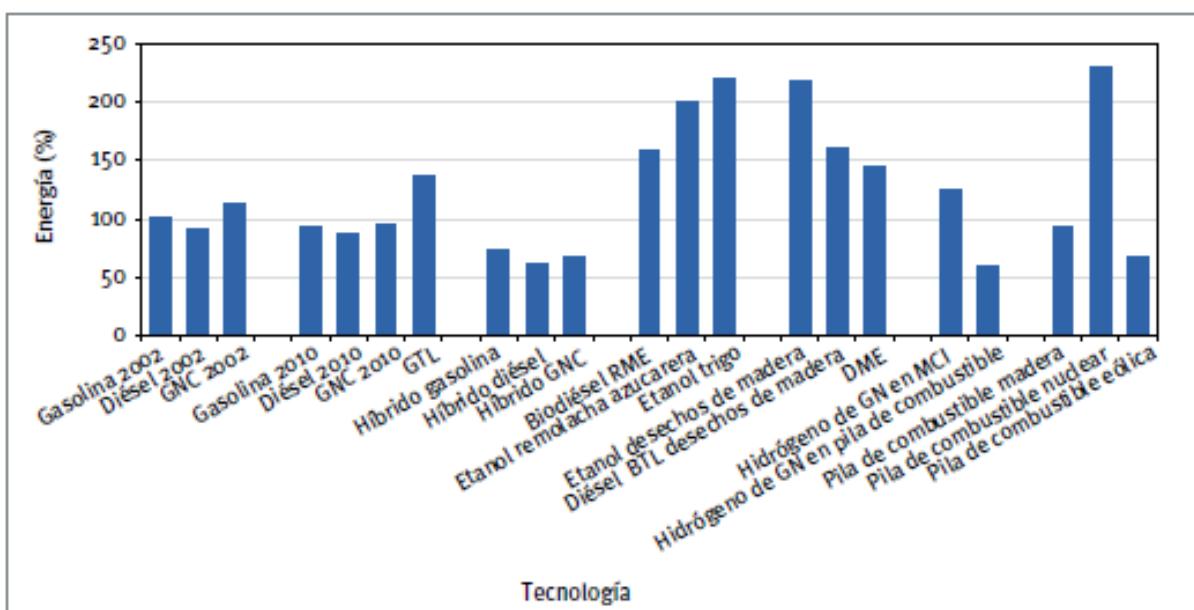
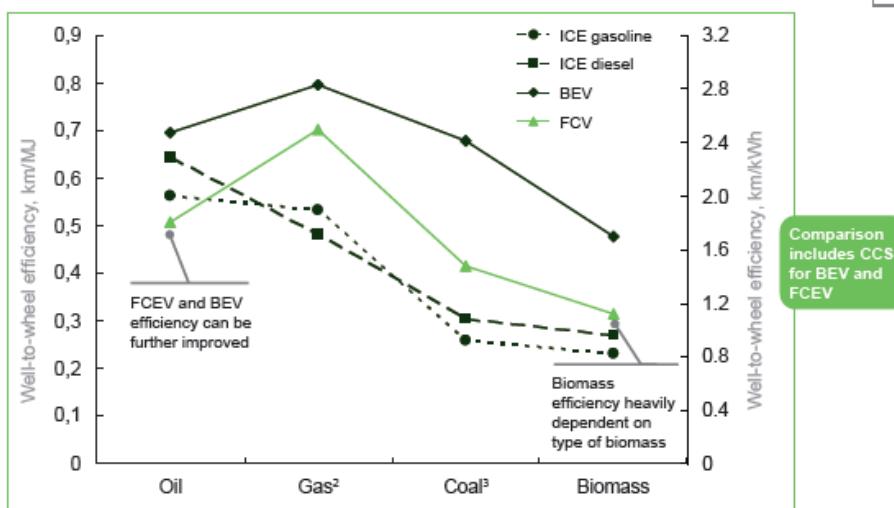


Fig.8. Energía consumida en el caso de los diferentes combustibles y sistemas de propulsión (en porcentaje y con respecto a la energía asociada a los vehículos convencionales de gasolina en el año 2002. Fuente: **FITSA, IDAE, 2008**.

Las principales conclusiones obtenidas en este balance energético de las tecnologías, combustibles y sistemas de propulsión (*Fig.8*) se muestran a continuación:

- Las últimas modificaciones en los vehículos permitirán aumentar su eficiencia energética, se prevé que el consumo de energía haya disminuido en los vehículos de gasolina del año 2010.
- Los vehículos híbridos permiten una mayor reducción del consumo energético (~35%), ya que su eficiencia energética global es mayor.
- En el caso del hidrógeno, el análisis varía en función de la fuente de energía a partir de la cual se produce, y del tipo de vehículo en el que se utiliza dicho combustible (de combustión interna o de pila de combustible). Si se utiliza el hidrógeno obtenido por reformado de gas natural en vehículos con motor de combustión interna, el consumo de energía fósil es sólo ligeramente superior al correspondiente a la utilización directa de gas natural. Si el hidrógeno se utiliza en vehículos de pila de combustible, el consumo energético es entonces mucho menor, debido a la mayor eficiencia de este sistema de propulsión. ***El objetivo es utilizar en vehículos de pila de combustible hidrógeno obtenido mediante electrolisis a partir de energías renovables como la biomasa o la energía eólica.***
- El balance energético de los vehículos eléctricos dependerá de la eficiencia de la fuente de energía que la produzca (la electricidad es un vector energético y no una fuente de energía), del rendimiento durante el transporte desde su lugar de producción hasta el punto de consumo y de la eficiencia del sistema de propulsión del vehículo. ***En general, la eficiencia global es más elevada en el caso de los vehículos eléctricos que en el caso de los vehículos con motor de combustión interna (McKinsey & Company, 2011).***

El estudio llevado a cabo por McKinsey & Company (***McKinsey & Company, 2011***) concluye que los vehículos eléctricos tienen una mayor eficiencia energética que los vehículos de motor de combustión interna para un amplio rango de materias primas. En la *Fig. 9* se muestra la eficiencia “well-to-wheel” de diferentes sistemas de propulsión utilizando diferentes tipos de fuentes de energía primaria. Los BEVs son la solución más eficaz. Los FCEVs tienen una mayor eficiencia que los vehículos de motor de combustión interna utilizando gas y carbón. Utilizando petróleo y biocombustibles, la diferencia entre los vehículos de motor de combustión interna y los vehículos de pila de combustible es pequeña.



1 All power-trains have different performance criteria and therefore different driving missions  
 2 CNG used in gasoline ICE; diesel production from natural gas through Fischer-Tropsch process  
 3 Gasoline and diesel production from coal-to-liquids transformation through Fischer-Tropsch process

Fig.9. La eficiencia Well-to-Wheel de los FCEVs es comparable a la de los ICEs (vehículos de combustión interna), mientras que los BEVs siguen siendo el sistema de propulsión más eficiente. Fuente: McKinsey & Company, 2011).

#### 5.4. Balance del grado de desarrollo tecnológico y de las infraestructuras.

En la siguiente tabla (Tabla 5) se muestra el grado de desarrollo tecnológico y el nivel de madurez de las infraestructuras en España para cada uno de los sistemas de propulsión analizados:

Tabla 5. Grado de desarrollo tecnológico y madurez de las infraestructuras en España para los diferentes sistemas de propulsión y combustibles alternativos. Fuente: FITSA, IDAE, 2008.

Combustible/Sistema de propulsión	Grado de desarrollo de la tecnología	Grado de desarrollo de la infraestructura
Vehículos eléctricos	Alto	Bajo
Vehículos híbridos	Muy Alto	Muy Alto
Pila de combustible	Bajo	Muy Bajo
Hidrógeno en MCI	Alto	Muy Bajo

Según se puede observar en la Tabla 5, en la actualidad el grado de desarrollo tecnológico y el nivel de madurez de las infraestructuras de aprovisionamiento de cada uno de los combustibles y sistemas de propulsión analizados son los siguientes:

- Que la utilización de los vehículos eléctricos se incremente depende de que se alcance un mayor grado de desarrollo de las baterías. Hay que señalar que aunque en la tabla aparece un grado de desarrollo de la infraestructura de abastecimiento “bajo”, existen algunos vehículos eléctricos que pueden recargarse conectándose directamente a la red eléctrica, eliminándose de este modo la necesidad de infraestructuras específicas.

- Los vehículos híbridos están siendo desarrollados por la mayoría de marcas de automóviles. Este tipo de vehículos utiliza infraestructuras convencionales de abastecimiento de combustible.
- En cuanto al hidrógeno, no existe una red establecida de suministro de hidrógeno. Las pilas de combustible están aún en fase de desarrollo, mientras que los vehículos que utilizan hidrógeno en motores de combustión interna tienen una tecnología más sencilla y desarrollada (pero su desarrollo tecnológico está limitado por la complejidad del almacenamiento del hidrógeno a bordo del vehículo).

En cuanto al coste de la infraestructura del combustible, el informe National Research Council 2008 (**Ramage, 2008**) estimó que una estación de abastecimiento de hidrógeno basado en gas natural reformado costaría aproximadamente 2.2 millones de \$ (1,64 millones de euros). Esta estación podría dar servicio a 2.300 FCEVs, por eso el coste medio de infraestructura sería de 995\$. (Asumiendo 4,5 kg de hidrógeno para viajar 560 km en un FCEV, 1.500 kg/día de capacidad de hidrógeno, 70% de capacidad promedio de la estación, y 20.900 km viajados por año por FCEV).

En las siguientes décadas, los costes para la distribución de hidrógeno y la infraestructura al por menor serán el 5% del total del coste de los FCEVs (1.000-2.000 € por vehículo) y comparable con el despliegue de la infraestructura de carga de los BEVs y PHEVs (**Thomas CE (2), 2009, McKinsey & Company, 2011**).

## 5.5. Análisis económico social.

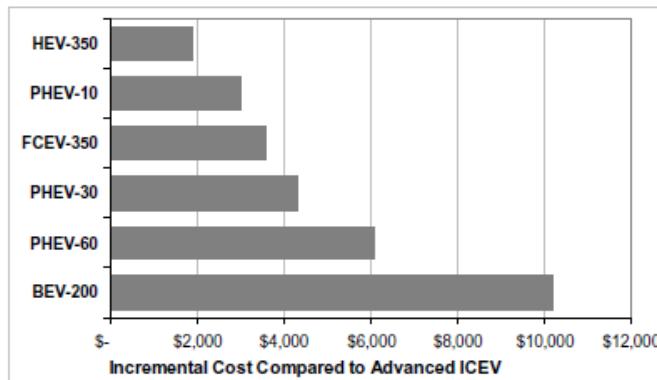
Los vehículos eléctricos tienen unos costes muy elevados, teniendo en cuenta sus prestaciones. Por otro lado, los vehículos híbridos tienen también unos costes superiores a los vehículos convencionales. Cuando se desarrolla un vehículo eléctrico híbrido, los fabricantes pueden optar entre una configuración del tipo semihíbrido o una del tipo híbrido puro, siendo la opción semihíbrido la solución más económica. Los factores económicos clave en el coste de un vehículo híbrido son:

- El coste del motor eléctrico.
- El coste de la tecnología de la batería.
- El coste del sistema eléctrico y de la electrónica de potencia.

En la actualidad dichas diferencias de costes se trasladan directamente al usuario, quien tiene que pagar un importante sobreprecio al adquirir un vehículo híbrido en lugar de otro equivalente convencional. En la actualidad, dicho sobreprecio no se compensa ni con subvenciones públicas ni con los ahorros que se obtienen en el consumo de combustible. Por lo tanto, la industria del automóvil debe solucionar este problema y ofrecer vehículos híbridos a un precio de venta más asequible. Ello se conseguirá en parte mediante la comercialización a gran escala de estos modelos, reduciendo así los costes de fabricación.

Por otro lado, la viabilidad económica de los vehículos de hidrógeno está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora del sistema de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje.

Hay estudios que han comparado el coste de varios vehículos producidos en masa (**Kromer M. et al, 2007**). Se concluye que un vehículo eléctrico con batería con una autonomía de 320 km costaría aproximadamente 7.597 € (10.200 \$) más que un vehículo convencional, mientras que un vehículo eléctrico con pila de combustible con una autonomía de 560 km se estima que costará 2.684 € (3.600 \$) más que un vehículo convencional. Los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEVs Plug-in hybrid electric vehicles) con una autonomía de 16 km como eléctrico solamente cuestan menos que el vehículo de pila de combustible, pero los vehículos híbridos enchufables con una autonomía de 100 km se espera que cueste unos 4.483 € (6.000 \$) más que los vehículos convencionales de gasolina. Si se extrapolan los datos (**Kromer M. et al, 2007**) para los vehículos eléctricos de batería a una autonomía de 480 km, entonces lo BEV costarían 14.568 € más que un coche convencional producido en masa (*Fig.10*).



*Fig.10. Incremento de coste estimado para la producción en masa de vehículos híbridos y eléctricos comparados con los vehículos de motor de combustión interna convencional de gasolina (los números indican la autonomía total en millas para los vehículos HEV, FCEV y BEV y el rango total eléctrico para PHEVs). Fuente: Thomas CE (2), 2009.*

En cuanto al coste del combustible de un vehículo eléctrico o de pila de combustible (electricidad o hidrógeno respectivamente) por kilómetro recorrido dependerá del precio del combustible por unidad de energía y del consumo de combustible del vehículo. El precio residencial de la electricidad es proyectada por DOE's Energy Information Administration en su informe anual y será aproximadamente de 10,8 cents/kWh durante el período 2012-2015, que se corresponde con 31,64\$/MBTU. El NRC estima que el hidrógeno costará aproximadamente 3,30\$/kg ó 29,05\$/MBTU. Por lo tanto, el coste del combustible por unidad de energía será comparable una vez que haya una infraestructura de hidrógeno (**Thomas CE (2), 2009**).

Sin ayudas, inicialmente, los costes del hidrógeno serán mayores antes de que haya suficientes FCEVs en la carretera para proporcionar a las compañías de energía un razonable retorno a su inversión. Además los propietarios de los vehículos eléctricos de batería pueden recibir tarifas de electricidad más bajas si recargan las baterías por la noche. El coste por milla para un propietario de BEV con una tarifa de 6 cents/kWh será aproximadamente la mitad del coste del hidrógeno por km para un propietario de un FCEV (ver Tabla 6) (**Thomas CE (2), 2009**).

*Tabla 6. Coste estimado de combustible (céntimos por kilómetro) para los conductores de vehículos eléctricos de baterías y para los conductores de vehículos eléctricos de pila de combustible. Fuente: Thomas CE (2), 2009.*

Range (km)	Electricity		Hydrogen \$3.30 /kg
	6 cents/kWh Off-Peak	10.8 c/kWh Residential	
161	1.37	2.47	3.33
241	1.41	2.54	3.35
322	1.53	2.75	3.36
402	1.67	3.00	3.38
483	1.85	3.34	3.40

This lower fuel cost when off-peak rates are available would help to offset the higher initial price of the BEV. But the buyer of a 320-km (200-mile) BEV would still pay \$1,042 more for that vehicle

Aunque se consigan unas tarifas más económicas, el comprador de un BEV de autonomía 320 km todavía pagará 778,5 € más por este vehículo con una tarifa de electricidad de 6 cents/kWh para circular durante 15 años que el comprador de un vehículo FCEV de una autonomía de 560 km incluyendo 15 años de combustible de hidrógeno. Un comprador de un BEV de autonomía de 480 km se gastaría más de 8.453 € más durante 15 años. Ambos cálculos asumen unos 20.900 km recorridos al año. Se espera que los BEVs y FCEVs tengan un precio de compra mayor que los vehículos de motor de combustión interna y un menor coste de combustible (debido a la elevada eficiencia y a que no usan petróleo) y menos coste de mantenimiento (menos partes rotatorias) (**Thomas CE (2), 2009**).

**Los PHEVs son más económicos que los BEVs y los FCEVs a corto plazo. En el año 2030, los BEVs, FCEVs y PHEVs tendrán un coste competitivo con los vehículos de motor de combustión interna en segmentos relevantes, pero con las subvenciones y ayudas, los BEVs y FCEVs podrían ser competitivos con los vehículos de motor de combustión interna en el año 2020 (McKinsey & Company, 2011).**

Según el estudio llevado a cabo por McKinsey & Company (**McKinsey & Company, 2011**), después del año 2025, el coste total de propiedad (TCO, total cost of ownership) de todos los sistemas de propulsión convergerá. El TCO en este estudio incluye:

- Precio de compra: suma de todos los costes necesarios para entregar el vehículo montado al cliente particularizando para cada tren de potencia y segmento existente.
- Costes de funcionamiento:
  - o Costes de mantenimiento.
  - o Costes de combustible basados en la economía de combustible del vehículo y en la autonomía, incluyendo todos los costes para entregar el combustible en el punto de abastecimiento y los gastos de amortización de capital de las inversiones realizadas para la producción de combustible, distribución y venta al por menor.

Se espera que los vehículos eléctricos de batería (BEVs) y los vehículos de pila de combustible (FCEVs) tengan un precio de compra mayor que los vehículos de motor de combustión interna (ICEs), menor coste de combustible (debido a su gran eficiencia y por no usar petróleo) y menor coste de mantenimiento (ya que tienen menos partes mecánicas).

Dicho estudio (**McKinsey & Company, 2011**) también afirma que se espera que los costes de los sistemas de pila de combustible disminuyan un 90%, debido a las economías de escala y a las mejoras en la tecnología.

El coste del sistema de pila de combustible es el elemento más significativo desde el punto de vista económico en un vehículo de pila de combustible (otros elementos que contribuyen en el coste son el tren de potencia eléctrico y el depósito de hidrógeno). La reducción de coste de los vehículos de pila de combustible, por lo tanto, se debe conseguir mediante las mejoras en la ingeniería y una mayor eficiencia en el proceso de fabricación. Esto incluye:

- Mejoras en el diseño, quitando componentes.
- Uso de nuevos materiales, sustituyendo el uso de platino, reducción de la degradación de la pila de combustible.
- Mejoras en la tecnología de producción.
- Economías de escala (1 millón de vehículos de pila de combustible en la Unión Europea para el año 2020).

Los BEVs, FCEVs u PHEVs son tecnologías complementarias que tienen algunos componentes de la parte eléctrica similares, por ejemplo la batería y el accionamiento eléctrico. Por lo tanto, inversiones en los BEVs y PHEVs también benefician a los FCEVs y viceversa.

Este estudio (**McKinsey & Company, 2011**) también afirma que el coste del hidrógeno se reducirá un 70% en el año 2025.

## **5.6. Estudio de disponibilidad de los distintos sistemas en el mercado.**

En este apartado se va a analizar la disponibilidad de distintos sistemas en el mercado. A continuación se analizan cada uno de los sistemas bajo estudio en este análisis comparativo.

### **Vehículos eléctricos**

Los mercados potenciales de los vehículos eléctricos son las flotas de servicios de transporte urbano de viajeros y de recogida de basuras, las flotas de vehículos ligeros de organismos públicos y, en menor medida, los vehículos para uso particular. En todos estos casos, la distribución de electricidad hasta los vehículos se hace a través de la red ordinaria.

Desde hace relativamente pocos años están a la venta para mayoristas varios modelos de autobuses eléctricos y vehículos de baterías.

En la actualidad, los vehículos eléctricos impulsados por baterías no ofrecen ni la autonomía ni la velocidad que ofrecen los vehículos convencionales. La introducción de los vehículos eléctricos en el mercado está limitada hasta que dichos vehículos no alcancen el nivel de prestaciones demandado actualmente por la sociedad.

### **Vehículos eléctricos híbridos**

Este tipo de vehículos tiene en el mercado precios superiores a los precios de sus equivalentes convencionales, aunque a cambio ofrecen un importante ahorro de combustible. En la mayoría de los países de la Unión Europea, al igual que en muchos estados y ciudades de EE.UU., estos vehículos cuentan con subvenciones para su compra, por ejemplo en forma de reducciones en los impuestos.

### **Vehículos de pila de combustible**

La viabilidad económica de los vehículos de pila de combustible impulsados por hidrógeno está ligada a la reducción de los costes de producción de las pilas de combustible, a la mejora de los sistemas de almacenamiento del hidrógeno en los vehículos, mejora de la funcionalidad y operatividad de la pila y, sobre todo, al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje, como se ha indicado anteriormente. Por el momento existe un número muy limitado de estaciones de hidrógeno, y la mayoría de éstas son de carácter privado. En cualquier caso, muchos fabricantes de automóviles disponen ya de prototipos de vehículos de pila de combustible.

### **Vehículos con motores de combustión interna (MCI) impulsados por hidrógeno**

Algunos fabricantes están apostando por los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno como primer paso para crear la demanda suficiente de este combustible que justifique el desarrollo de una mínima red de abastecimiento si bien, de momento, estos vehículos no compiten en prestaciones, potencia, autonomía y rendimiento al equivalente con combustible tradicional.

En el estudio realizado por FITSA e IDAE (**FITSA, IDAE, 2008**) se lleva a cabo un análisis prospectivo a 2020 de las nuevas tecnologías de propulsión y combustibles alternativos. Para ello define una serie de indicadores cuya evolución en los próximos años ayudará a estimar una viabilidad futura y una guía de introducción de los distintos sistemas de propulsión y combustibles alternativos en el mercado.

Los indicadores más importantes son el coste global del vehículo (coste del vehículo + coste del combustible) y la existencia de una red de abastecimiento.

En la siguiente tabla (*Tabla 7*) se muestran los valores de los indicadores globales de viabilidad futura.

*Tabla 7. Resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de los diferentes combustibles alternativos. Fuente: FITSA, IDAE, 2008.*

Combustibles	2015	2020
Biodiésel	3,91	4
Bioetanol	3,77	3,9
“Gas a líquido” (GTL)	3,14	3,27
“Biomasa a líquido” (BTL)	3,31	3,59
Etanol lignocelulósico	3,5	3,8
Gas Natural	3,52	3,57
Gas licuado del petróleo (GLP)	3,08	3,1
H <sub>2</sub> en motores MCI	3,15	3,61

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta.

La previsión para el futuro es que la mayoría de los combustibles aumente su presencia en el mercado. El biodiesel, bioetanol, “gas a líquido” y “biomasa a líquido” tendrán una evolución paralela. Mientras que el hidrógeno tendrá una evolución lenta en los próximos años ya que necesita el desarrollo de tecnologías para su completa introducción en el mercado. Se espera que el hidrógeno experimente el mayor crecimiento de todos los combustibles a medida que se acerque el año 2020.

En la *Tabla 8* se presenta el resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de los principales sistemas de propulsión.

*Tabla 8. Resumen de los indicadores globales de viabilidad futura de las modificaciones técnicas y de los nuevos sistemas de propulsión. Fuente: FITSA, IDAE, 2008.*

Sistema de propulsión	2015	2020
Encendido por compresión de carga homogénea	3,23	3,33
Auto-encendido controlado	3,11	3,14
Vehículos eléctricos	3,43	3,75
Vehículos híbridos	3,86	4,01
Vehículos de pila de combustible	3,17	3,78

Leyenda: 1 Muy baja. 2 Baja. 3 Media. 4 Alta. 5 Muy alta.

Los MCI seguirán siendo como hasta el momento, el sistema de propulsión más importante en los próximos años. Dichos motores pueden ser adaptados para funcionar con diferentes combustibles, reduciendo así costes.

Los vehículos híbridos serán los que tendrán un mayor desarrollo a corto y medio plazo, ya que tienen una tecnología desarrollada, tienen ayudas públicas y permiten mejorar la eficiencia y comportamiento medioambiental de los vehículos convencionales. El siguiente reto es reducir su coste.

Aunque tienen una tecnología menos desarrollada que los híbridos, ofrecen menos prestaciones y tienen una autonomía más reducida, los vehículos eléctricos tendrán una evolución similar a los vehículos híbridos en los siguientes años.

Lo que se concluye es que a corto plazo muchos fabricantes están optando por soluciones híbridas, mientras que a largo plazo la pila de combustible será una solución para mejorar las características medioambientales y la eficiencia energética de los vehículos eléctricos. Las pilas de combustible podrían tener un desarrollo importante a partir del año 2020.

El estudio llevado a cabo por FITSA e IDAE (**FITSA, IDAE, 2008**) concluye que la aparición del hidrógeno en el mercado, utilizado inicialmente como combustible en vehículos de motor de combustión interna, tendrá lugar entre los años 2012 y 2030. También concluye que la introducción de las pilas de combustible se espera en torno a los años 2025-2030. Y se espera que la propulsión eléctrica se introduzca en el mercado de manera importante en el período 2015-2025, aunque se tiene que mejorar la autonomía de las baterías.

Los resultados de este estudio (**FITSA, IDAE, 2008**) permiten establecer una clara tendencia de la diversificación energética y de la existencia de distintos combustibles y tecnologías.

Los vehículos eléctricos debido a su baja autonomías están limitados a su uso en zonas urbanas, pero estos vehículos tienen emisiones nulas de gases de efecto invernadero y de contaminantes, siendo sus emisiones acústicas muy reducidas, siendo idóneos para utilizarlos en dichas zonas.

Por otro lado, los vehículos híbridos y las tecnologías de “parada y arranque” permiten mejorar la eficiencia energética de los vehículos y reducir sus emisiones, siendo idóneos para utilizarlos en zonas urbanas. La diferencia con los anteriores es que no tienen una baja autonomía.

En la actualidad, muchas flotas de vehículos para transporte urbano utilizan combustibles gaseosos (gas natural o gases licuados del petróleo). Estos combustibles necesitan grandes depósitos de almacenamiento a bordo, pero estos combustibles son más económicos que la gasolina y el diésel y producen menos emisiones contaminantes. Para el caso de transportes de mayor recorrido son más adecuados los combustibles líquidos ya que permiten una mayor autonomía para un determinado volumen de depósito.

## 5.7 Comparativa económica de los distintos tipos vehículos.

Para hacer una comparativa económica entre los distintos tipos de vehículos se va a utilizar el coste total de propiedad (TCO, total cost of ownership), pero simplificado ya que solamente se va a tener en cuenta el precio de compra del vehículo y el precio del combustible, según la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} TCO (\text{€}) = & \text{ Precio de compra del vehículo (\text{€})} + (\text{Consumo del vehículo(kg H}_2\text{/100km)} \\ & * \text{ Precio del combustible (\text{€}/kg)} * \text{ Kilómetros medios recorridos al año (km/año)} \\ & * \text{ Vida útil vehículo (años)}) \end{aligned}$$

Se lleva a cabo la comparación entre el TCO de vehículos de pila de combustible y el TCO de vehículos de gasolina. Para calcular el TCO de vehículos de pila de combustible se ha considerado como referencia el vehículo Hyundai ix35 fuel cell (ver *Tabla 9*) cuyo precio de compra son 125.000 € y tiene un consumo de 0,95 kg H<sub>2</sub> / 100 km. Se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 15 años (**McKinsey & Company, 2011**) (Ver *Fig.11, línea morada discontinua*). Para calcular el TCO se han considerado distintos precios del combustible, en este caso el hidrógeno (desde 0 hasta 20 €/kg H<sub>2</sub>), de esta manera se analiza como varía el TCO en función del coste del hidrógeno. Se observa que al aumentar el precio del H<sub>2</sub> el TCO aumenta.

Por otro lado, para calcular el TCO de un vehículo de gasolina y llevar a cabo un análisis comparativo se ha considerado un vehículo de las mismas propiedades que el Hyundai ix35 fuel cell. El vehículo analizado es Hyundai ix35 1.6 GDi 4x2 stadt (ver *Tabla 9*) cuyo precio de compra es 20.157 € y tiene un consumo de 6,8 l/100 km. Para el vehículo de gasolina se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 10 años (Ver *Fig.11, línea roja oscura*). En este tipo de vehículo se ha calculado el TCO para cuatro valores de precio de gasolina: precio actual de la gasolina 142,96 cts€ /l (valor de junio 2013) (**Minetur, 2013**), 2 €, 2,5 € y 3 €

Tabla 9. Tabla comparativa de un vehículo de pila de combustible, de un vehículo de gasolina y de un vehículo diesel. Fuente: **Elaboración propia.**

	PILA DE COMBUSTIBLE	GASOLINA	DIESEL
<b>Fabricante</b>	Hyundai	Hyundai	Hyundai
<b>Vehículo</b>	ix35 fuel cell	Hyundai ix35 1.6 GDi 4x2 stadt	Hyundai ix35 2.0 CRDi 4x2 Tecno
<b>Año</b>	2012	2013	2013
<b>P(kW)</b>	100 kW (136 CV)	99kW (135 CV) <sup>(3)</sup>	100kW (136 CV) <sup>(4)</sup>
<b>Consumo (kg H<sub>2</sub>/100 km)</b>	0,95 kg H <sub>2</sub> /100 km <sup>(2)</sup>	6,8 l / 100 km <sup>(3)</sup>	5,5 l / 100 km <sup>(4)</sup>
<b>Consumo (MJ/100 km)</b>	114 MJ/100 km	219,43 MJ/100 km <sup>(6)</sup>	197,23 MJ/100 km <sup>(6)</sup>
<b>PCI</b>	120 MJ/kg	43,2 MJ/kg <sup>(5)</sup>	43,1 MJ/kg <sup>(5)</sup>
<b>Autonomía</b>	594 km		
<b>Velocidad máxima</b>	160 km/h	178 km/h <sup>(3)</sup>	182 km/h <sup>(4)</sup>
<b>Fabricante Pila</b>	HMC (Hyundai Motor Company)		
<b>Volumen Pila</b>	1,65 kW/l (densidad de potencia) <sup>(1)</sup>		
<b>Precio</b>	125.000 €	20.157 € <sub>(tarifa 15/06/2013)</sub> <sup>(3)</sup>	25.947 € <sub>(tarifa 15/06/2013)</sub> <sup>(4)</sup>
<b>Depósito (capacidad)</b>	2 depósitos, 5,64 kg (en total)	58 litros <sup>(3)</sup>	58 litros <sup>(4)</sup>
<b>Aspectos especiales</b>	Ganador del premio FuturAuto 2013. Arranca a -25 °C. Hyundai tiene prevista la fabricación de 1.000 unidades de vehículos ix35 Fuel Cell impulsados por hidrógeno para el año 2015, destinadas principalmente al sector público y a flotas particulares, con una producción en serie limitada de 10.000 unidades después de 2015.		
<b>Combustible</b>	Hidrógeno comprimido 70 MPa	Gasolina	Gasóleo
<b>Peso</b>	1830 kg <sup>(2)</sup>	1380 kg <sup>(3)</sup>	1533 kg <sup>(4)</sup>
<b>Peso Bruto</b>	1980 kg <sup>(2)</sup>		

(1) [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac\\_may2012\\_hyundai.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf)

(2) [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_nov\\_marca/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_nov_marca/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)

(3) <http://www.km77.com/precios/hyundai/ix35/2010/ix35-16-gdi-4x2-stadt>

(4) <http://www.km77.com/precios/hyundai/ix35/2010/ix35-20-crди-136-cv-4x2-tecnico>

(5) [http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/TTW\\_Report\\_010307.pdf](http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/TTW_Report_010307.pdf)

(6) Valores densidad distintos combustibles: <http://www.boe.es/boe/dias/2010/09/04/pdfs/BOE-A-2010-13704.pdf>

Se observa que para el precio actual del vehículo de pila de combustible (125.000 €) y para el precio actual de la gasolina (**Minetur, 2013**), las dos líneas no se cruzan y por lo tanto se concluye que independientemente del coste del hidrógeno el vehículo de pila de combustible actual no es competitivo con el vehículo convencional de gasolina y que para serlo tendría que tener un precio de compra más reducido.

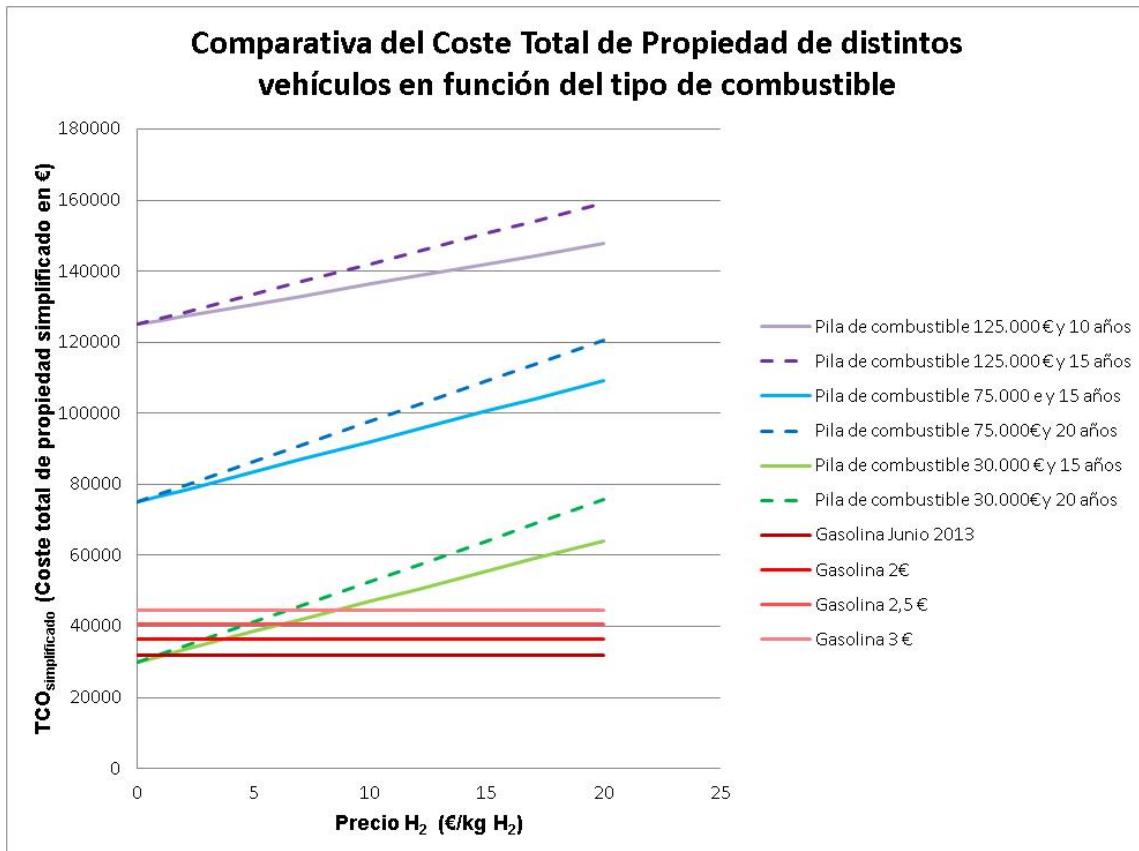


Fig. 11. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina. Fuente: **Elaboración propia.**

Por lo tanto, se vuelve a calcular el TCO del vehículo de pila de combustible para dos nuevos precios de compra del vehículo, 75.000 € (líneas azul) y 30.000 € (líneas verdes). Se concluye que si el precio de compra del vehículo es similar al precio de compra del vehículo convencional de gasolina, en función del precio del hidrógeno el vehículo de pila de combustible podría ser un vehículo competitivo con el vehículo convencional de gasolina.

Para los tres precios de compra del vehículo de pila de combustible se ha calculado el TCO para una vida útil del vehículo superior (líneas discontinuas). Se observa que al aumentar la vida útil del vehículo la pendiente de la línea aumenta, por lo que se concluye que para un coste determinado del hidrógeno al aumentar la vida útil del vehículo el TCO aumenta. Para el vehículo actual se ha considerado inicialmente una vida útil de 10 años y luego una vida útil de 15 años (el objetivo establecido que se pretende alcanzar). Y para los vehículos de costes de compra inferior, 75.000 € y 30.000 € se ha considerado 15 años y 20 años, ya que a medida que avance y se desarrolle la tecnología de este tipo de vehículos su vida útil también se incrementará.

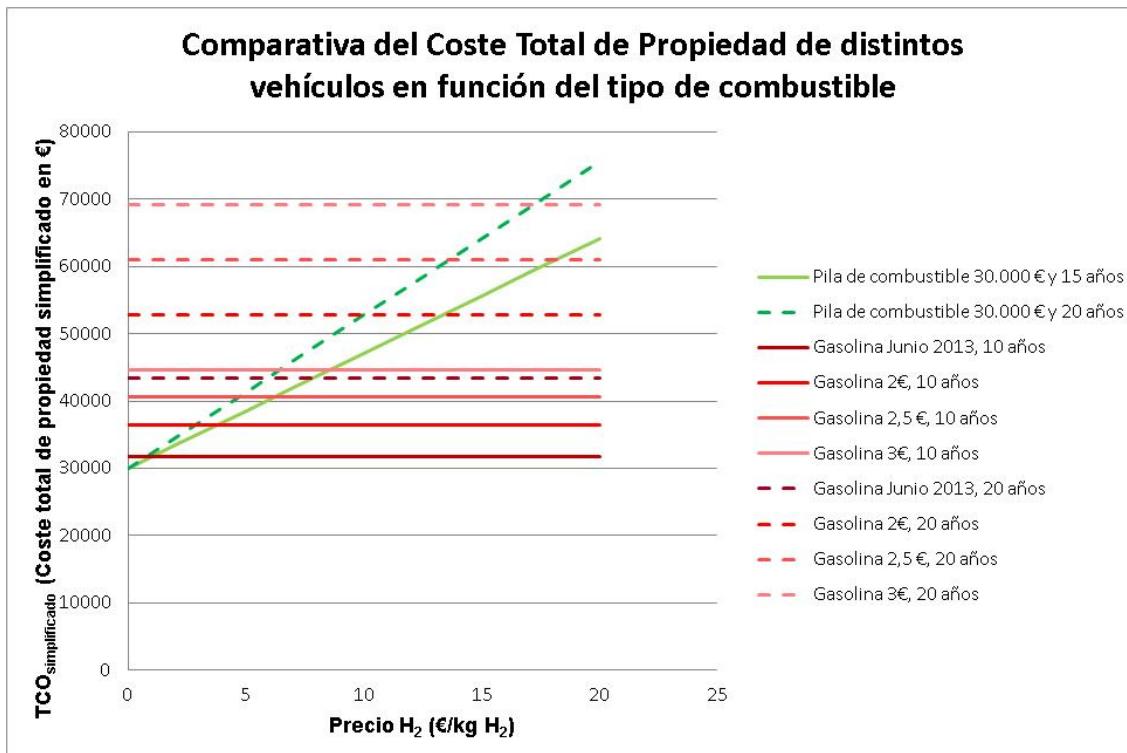


Fig.12. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina (caso: pila de combustible 30.000 €). Fuente: **Elaboración propia.**

En la Fig. 12 se ha representado el caso de pila de combustible 30.000 € ya que se ha concluido que sería el precio aproximado para el cual el vehículo de pila de combustible podría ser competitivo. Y para poder analizar la influencia de la vida útil de los vehículos se ha representado también, el TCO del vehículo convencional de gasolina para una vida útil de 20 años. Se observa que al aumentar la vida útil del vehículo convencional de gasolina el TCO aumenta lo que hace que el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible es competitivo con el vehículo convencional de gasolina sea mayor.

Para obtener valores concretos de precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con un vehículo convencional de gasolina, se han repetido los cálculos del TCO del vehículo de pila de combustible para el caso de que éste tuviese un precio de compra similar al del vehículo de gasolina, 20.157 € (Fig. 13 ).

Se observa que para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 15 años y el vehículo de gasolina una vida útil de 10 años, para el precio actual de la gasolina (**Minetur, 2013**), para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasolina el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 6,82 €/kg H<sub>2</sub>. Si el precio de la gasolina fuese mayor, que va a ser la tendencia, el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina podría ser mayor. Para el caso de que el precio de la gasolina fuese 2 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de

hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 9,54 €/kg H<sub>2</sub>. Para el caso de que el precio de la gasolina fuese 2,5 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 11,93 €/kg H<sub>2</sub>. Y para el caso de que el precio de la gasolina fuese 3 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 14,31 €/kg H<sub>2</sub>.

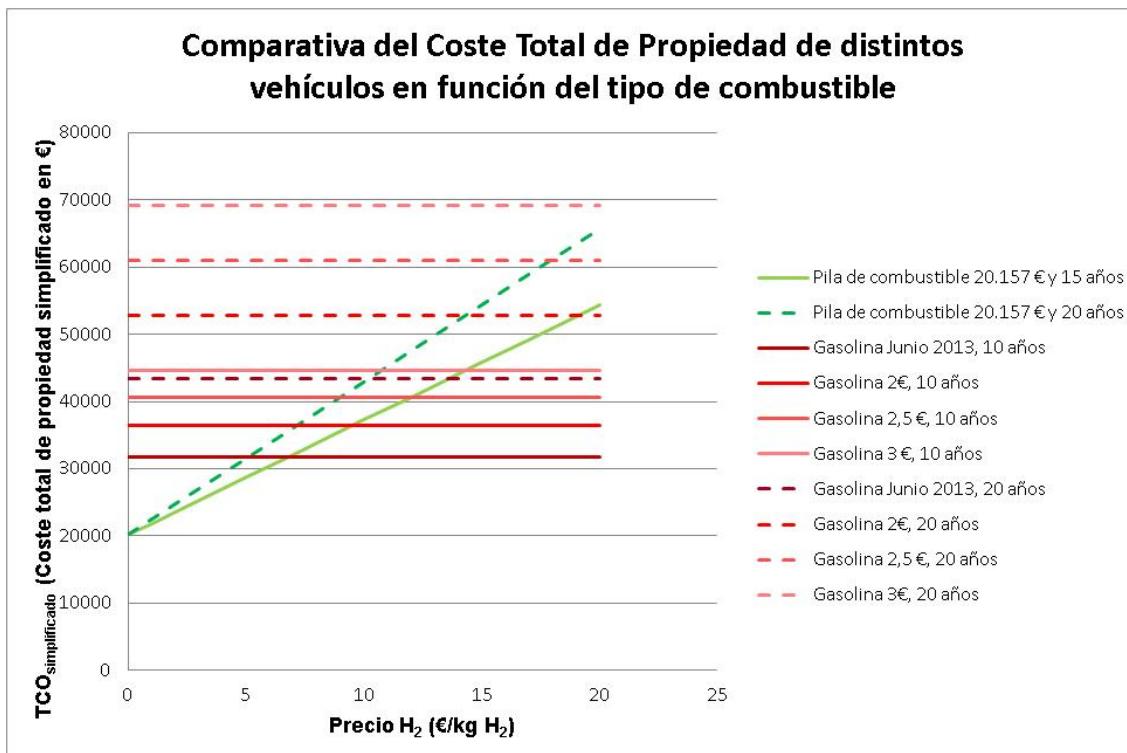


Fig. 13. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina. (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasolina). Fuente: **Elaboración propia**.

Si se lleva a cabo la misma comparativa pero para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años (línea verde discontinua) y para el caso de que el vehículo convencional de gasolina tenga una vida útil de 20 años (línea roja discontinua), que es la tendencia al desarrollarse la tecnología actual, se concluye lo siguiente.

En el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años y el vehículo de gasolina una vida útil de 20 años, para el precio actual de la gasolina (**Minetur, 2013**), para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasolina el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 10,23 €/kg H<sub>2</sub>. Este precio del hidrógeno es más elevado que para el caso de que la vida útil del vehículo de pila de combustible fuese de 15 años y la vida útil del vehículo de gasolina fuese de 10 años, ya que al incrementar la vida útil del vehículo el TCO aumenta. Si el precio de la gasolina fuese mayor, que va a ser la tendencia, el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de

gasolina podría ser mayor. Para el caso de que el precio de la gasolina fuese 2 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 14,31 €/kg H<sub>2</sub>. Para el caso de que el precio de la gasolina fuese 2,5 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 17,89 €/kg H<sub>2</sub>. Y para el caso de que el precio de la gasolina fuese 3 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 21,47 €/kg H<sub>2</sub>.

En las siguientes gráficas se va a llevar a cabo el mismo análisis comparativo del TCO pero para el caso del vehículo de pila de combustible y para el caso del vehículo diesel.

Para calcular el TCO de un vehículo de gasóleo y llevar a cabo un análisis comparativo se ha considerado un vehículo de las mismas propiedades que el Hyundai ix35 fuel cell. El vehículo analizado es Hyundai ix35 2.0 CRDi 4x2 Tecno (ver Tabla 9) cuyo precio de compra es 25.947 € y tiene un consumo de 5,5 l/100 km. Para el vehículo de gasóleo se ha considerado como distancia media recorrida al año 12.000 kilómetros y una vida útil del vehículo de 10 años (Ver Fig.14, línea azul oscuro). En este tipo de vehículo se ha calculado el TCO para cuatro valores de precio de gasóleo: precio actual del gasóleo 133,41 cts€ /l (valor de junio 2013) (**Minetur, 2013**), 2 €, 2,5 € y 3 €

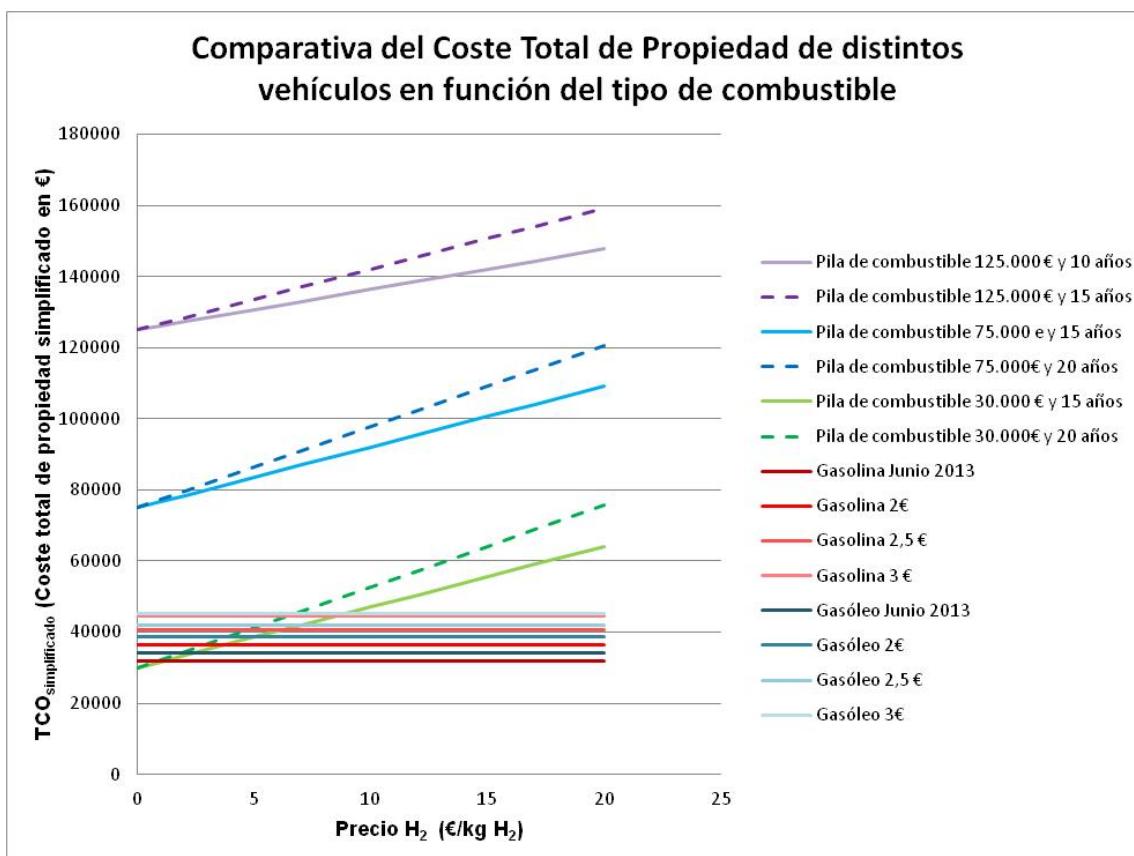


Fig. 14. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno, gasolina o diesel. Fuente: **Elaboración propia**.

En la Fig. 14 se observa que un vehículo diesel de las mismas características que el vehículo de pila de combustible analizado, es un poco más caro que el vehículo de gasolina de las mismas características, y a medida que va aumentando el precio del combustible la diferencia es menor.

Al igual que para el caso del vehículo convencional de gasolina, se concluye que si el precio de compra del vehículo de pila de combustible es similar al precio de compra del vehículo de gasóleo, en función del precio del hidrógeno el vehículo de pila de combustible podría ser un vehículo competitivo con el vehículo de gasóleo.

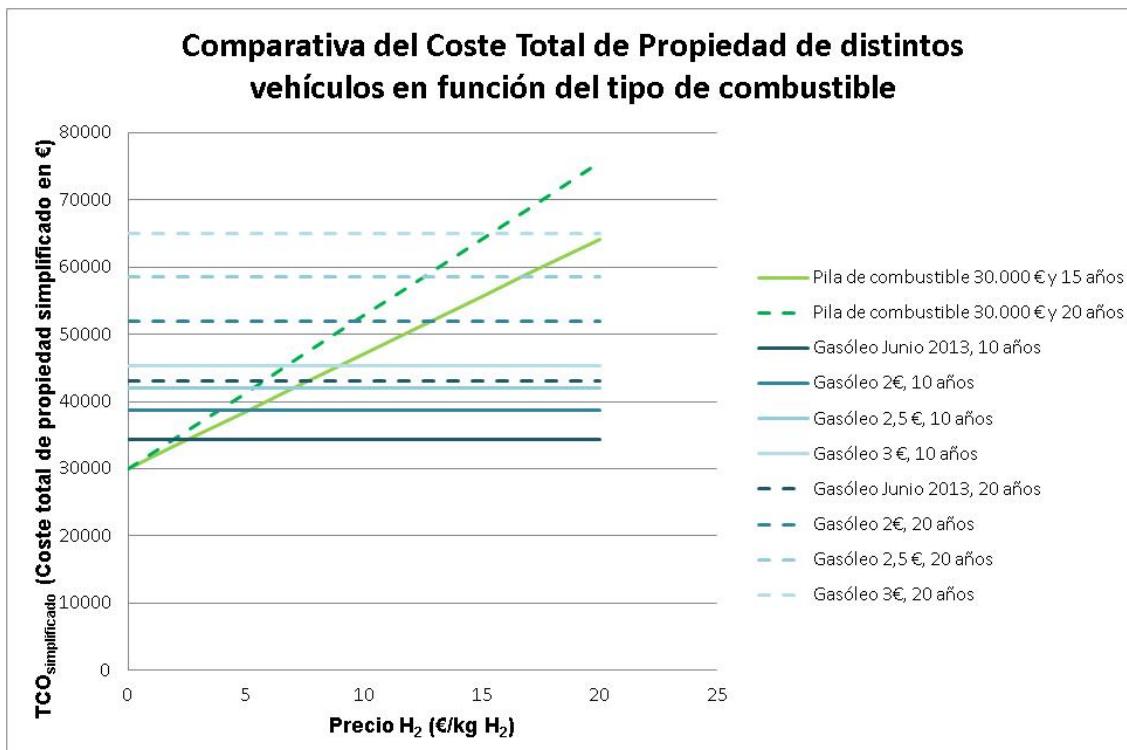


Fig. 15. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasóleo (caso: pila de combustible 30.000 €). Fuente: **Elaboración propia**.

En la Fig. 15 se ha representado el caso de pila de combustible 30.000 € ya que se ha concluido que sería el precio aproximado para el cual el vehículo de pila de combustible podría ser competitivo con el vehículo de gasóleo.

Para obtener valores concretos de precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con un vehículo de gasóleo, al igual que se ha hecho con el vehículo convencional de gasolina, se han repetido los cálculos del TCO del vehículo de pila de combustible para el caso de que éste tuviese un precio de compra similar al del vehículo de gasóleo, 25.497 € (Fig. 16).

Se observa que para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 15 años y el vehículo de gasóleo una vida útil de 10 años, para el precio actual de la gasóleo (*Minetur, 2013*) para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasóleo el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 5,15 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (6,82 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Si el precio de la gasóleo fuese mayor, que va a ser la tendencia futura, el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasóleo podría ser mayor. Para el caso de que el precio de la gasóleo fuese 2 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasóleo tendría que ser inferior a 7,72 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (9,54 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Para el caso de que el precio de la gasóleo fuese 2,5 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 9,65 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (11,93 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Y para el caso de que el precio de la gasóleo fuese 3 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 11,58 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (14,31 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar).

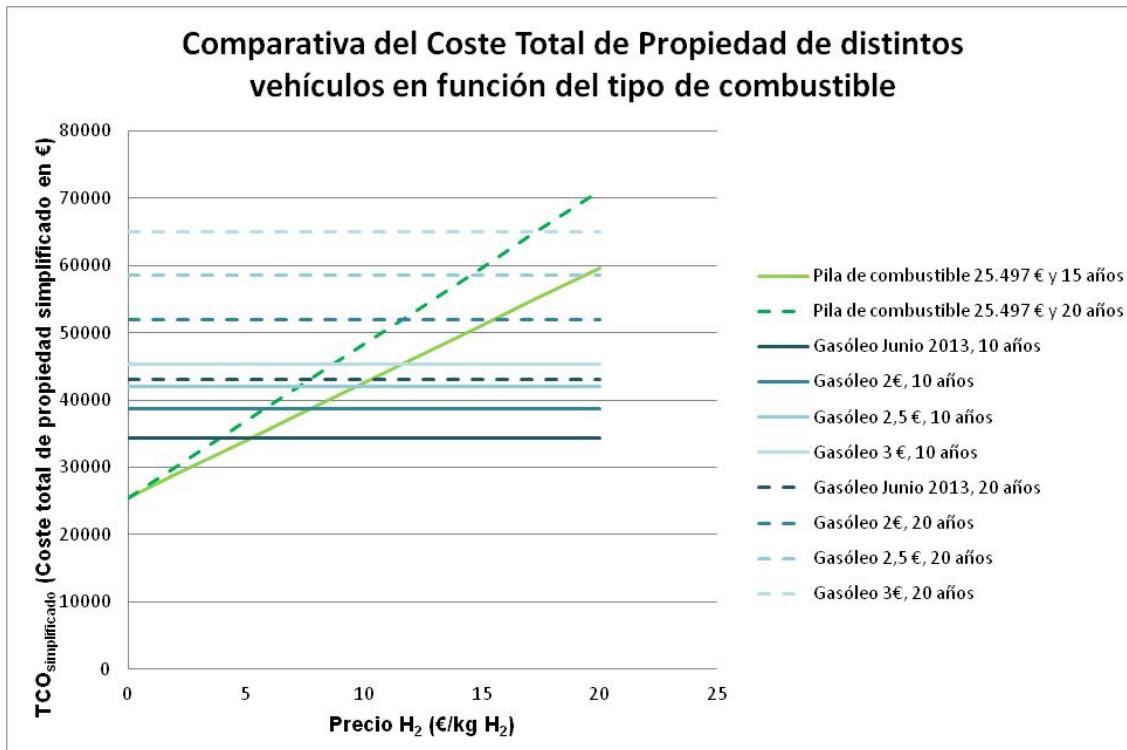


Fig. 16. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasóleo. (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasóleo). Fuente: **Elaboración propia.**

Si se lleva a cabo la misma comparativa pero para el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años (línea verde discontinua) y para el caso de que el vehículo de gasóleo tenga una vida útil de 20 años (línea azul discontinua), que es la tendencia futura al desarrollarse la tecnología actual, se concluye lo siguiente.

En el caso de que el vehículo de pila de combustible tenga una vida útil de 20 años y el vehículo de gasóleo tenga una vida útil de 20 años, para el precio actual del gasóleo (**Minetur, 2013**), para que el vehículo de pila de combustible fuese competitivo con el vehículo de gasóleo el precio del hidrógeno tendría que ser inferior a 7,72 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (10,23 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Este precio del hidrógeno es más elevado que para el caso de que la vida útil del vehículo de pila de combustible fuese de 15 años y la vida útil del vehículo de gasóleo fuese de 10 años, ya que al incrementar la vida útil del vehículo el TCO aumenta. Si el precio del gasóleo fuese mayor, que va a ser la tendencia futura, el precio del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasóleo podría ser mayor. Para el caso de que el precio del gasóleo fuese 2 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasóleo tendría que ser inferior a 11,57 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (14,31 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Para el caso de que el precio de la gasolina fuese 2,5 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 14,47 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (17,89 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar). Y para el caso de que el precio de la gasolina fuese 3 €, el precio del hidrógeno para que el vehículo de hidrógeno fuese competitivo con el de gasolina tendría que ser inferior a 17,36 €/kg H<sub>2</sub> (inferior al precio (21,47 €/kg H<sub>2</sub>) que tendría que tener el hidrógeno para que este vehículo de pila de combustible fuese competitivo con un vehículo de gasolina similar).

Una vez realizado el análisis comparativo del coste total de propiedad de cada vehículo en función del tipo de combustible utilizado, se ha llevado a cabo un análisis comparativo de este coste por kilómetro recorrido, ya que los kilómetros que recorre el vehículo y su vida útil van a influir sobre el coste final.

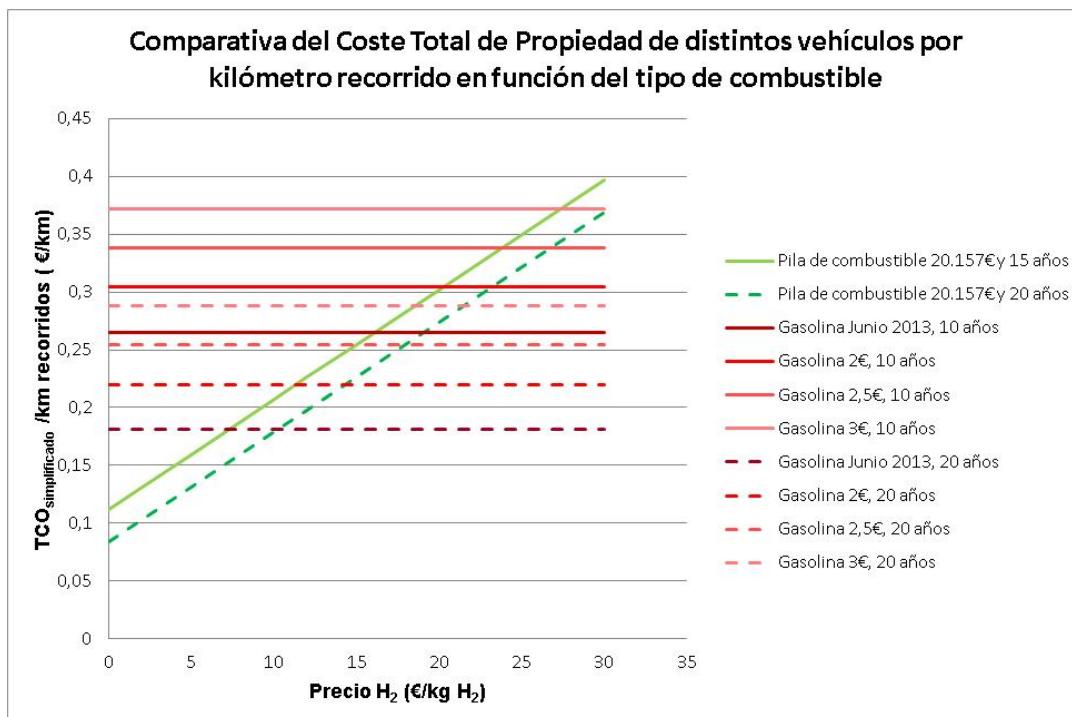


Fig. 17. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos por kilómetro recorrido en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina. (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasolina). Fuente: **Elaboración propia.**

Si se realiza la comparación teniendo en cuenta el coste total de propiedad por kilómetro recorrido, para que el vehículo de pila de combustible sea competitivo con el vehículo de gasolina convencional, suponiendo una vida útil para el primero de 15 años y una vida útil para el vehículo de gasolina de 10 años (situación actual) y suponiendo el precio actual de la gasolina, el hidrógeno tendría que costar menos de 16,12 €/kg H<sub>2</sub> (ver Fig.17). Se observa que si se tienen en cuenta los kilómetros recorridos durante la vida útil este límite es más elevado esto se debe a que actualmente la vida útil del vehículo de pila de combustible es mayor que la vida útil del vehículo convencional de gasolina. Si se analiza como influye el precio de la gasolina, al aumentar el precio de la gasolina lógicamente el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido también aumenta. En el caso de que la gasolina costase 3 € el hidrógeno tendría que tener un coste inferior a 27,37 €/kg H<sub>2</sub>.

En el supuesto de que tanto el vehículo de gasolina como el vehículo de pila de combustible tuviesen una mayor vida útil, 20 años para los dos casos, el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido lógicamente sería inferior y por lo tanto el valor del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasolina también sería inferior, 10,23 €/kg H<sub>2</sub> para el caso de que la gasolina tuviese el precio actual y 21,47 €/kg H<sub>2</sub> en el supuesto de que la gasolina costase 3 €.

Si se lleva a cabo el mismo análisis comparativo pero para el caso del vehículo de gasóleo se observa lo siguiente (Fig. 18).

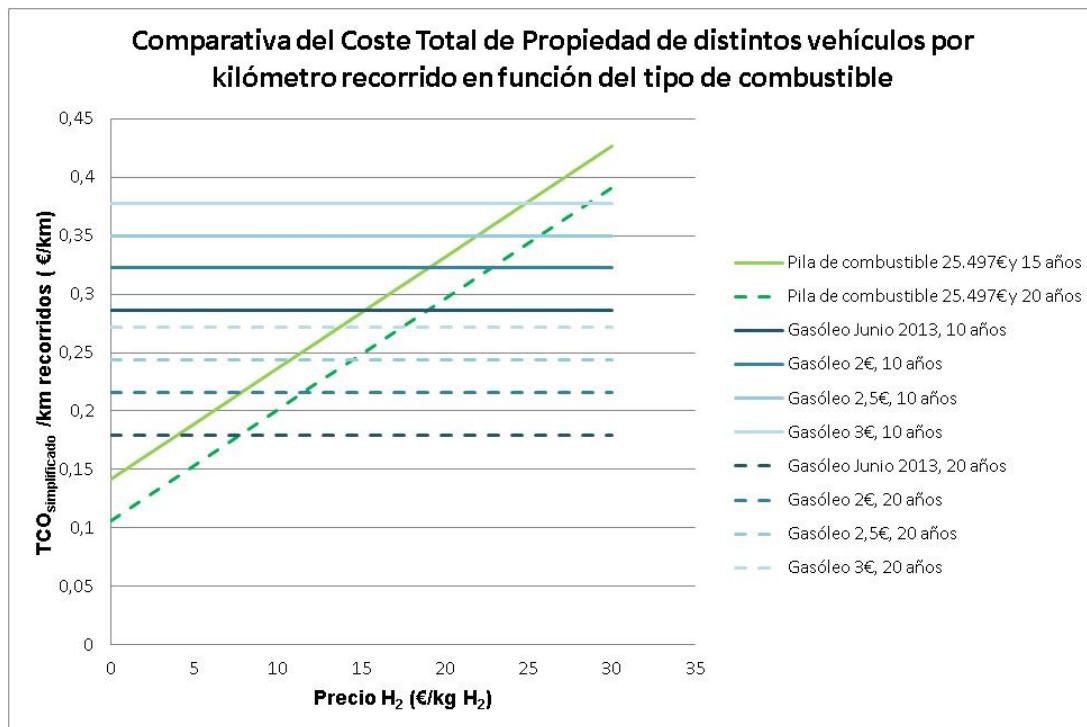


Fig. 18. Comparativa del Coste Total de Propiedad simplificado de distintos vehículos por kilómetro recorrido en función del tipo de combustible, hidrógeno o gasolina. (caso: vehículo de pila de combustible tenga el mismo precio de compra que el vehículo de gasolina). Fuente: **Elaboración propia.**

Para que el vehículo de pila de combustible sea competitivo con el vehículo de gasóleo, suponiendo una vida útil para el primero de 15 años y una vida útil para el vehículo de gasóleo de 10 años y suponiendo el precio actual del gasóleo, el hidrógeno tendría que costar menos de 15,17 €/kg H<sub>2</sub> (ver Fig. 18), este límite es un poco inferior al que se daba en el caso de la gasolina esto es debido a que el precio del vehículo de gasóleo es superior y a que el precio del gasóleo es inferior. Se observa que si se tienen en cuenta los kilómetros recorridos durante la vida útil este límite es más elevado esto se debe a que actualmente la vida útil del vehículo de pila de combustible es mayor que la vida útil del vehículo de gasóleo. Si se analiza como influye el precio del gasóleo, al aumentar el precio del gasóleo lógicamente el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido también aumenta. En el caso de que el gasóleo costase 3 € el hidrógeno tendría que tener un coste inferior a 24,82 €/kg H<sub>2</sub>.

En el supuesto de que tanto el vehículo de gasóleo como el vehículo de pila de combustible tuviesen una vida útil de 20 años, el TCO<sub>simplificado</sub> por kilómetro recorrido lógicamente sería inferior y por lo tanto el valor del hidrógeno a partir del cual el vehículo de pila de combustible sería competitivo con el vehículo de gasóleo también sería inferior, 7,72 €/kg H<sub>2</sub> para el caso de que la gasóleo tuviese el precio actual y 17,36 €/kg H<sub>2</sub> en el supuesto de que la gasóleo costase 3 €.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Ciemat, 2013.

<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/biocarburantes/001.htm>

FITSA, IDAE, 2008. Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión: situación y perspectivas para automoción.

Kromer M, Heywood J. Electric powertrains: Opportunities and challenges in the U.S. light duty vehicle fleet. Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology; Publication No. LFEE 2007-03 RP, May 2007.

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis.The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Minetur, 2013.

<http://www.minetur.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesMensuales/2013/Junio2013.pdf>

Parlamento Europeo, 2013.

[http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact\\_sheets/info/data/policies/environment/article\\_7297\\_es.htm](http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact_sheets/info/data/policies/environment/article_7297_es.htm)

Ramage MP, Chair, Committee on the Assessment of Resource Needs for Fuel Cell and Hydrogen Technologies, Transitions to Alternative Technologies –A focus on Hydrogen, National Research Council of the National Academies, Washington, DC, 2008. [http://books.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12222#toc](http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=12222#toc)

Stefano Campanari, Giampaolo Manzolini, Fernando Garcia de la Iglesia. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations, Journal of Power Sources, October 2008.

Thomas CE, (2). Fuel cell and battery electric vehicles compared. International Journal Hydrogen Energy 2009;34:6005-20.

**ANEXO VI. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H<sub>2</sub>  
MEDIANTE FUENTES RENOVABLES PARA  
SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE.**

**ANEXO VI. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H<sub>2</sub> MEDIANTE FUENTES  
RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE A LOS VEHÍCULOS.**

6.1. Producción de H <sub>2</sub> mediante reformado con vapor de agua.....	4
6.2. Producción de H <sub>2</sub> mediante gasificación.....	4
6.3. Producción de H <sub>2</sub> mediante Electrólisis del agua.....	4
6.4. Producción de H <sub>2</sub> a partir de energía solar. ....	5
6.5. Producción de H <sub>2</sub> a partir de energía solar-fotovoltaica. ....	5
6.6. Producción de H <sub>2</sub> a partir de energía eólica. ....	6
6.7. Producción de H <sub>2</sub> a partir de biomasa. ....	7
6.8. Análisis del H <sub>2</sub> necesario para alimentar a la flota actual de vehículos en España y análisis de la forma de producirlo.....	8
BIBLIOGRAFÍA.....	13

## ANEXO VI. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE PRODUCIR H<sub>2</sub> MEDIANTE FUENTES RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ESTE COMBUSTIBLE A LOS VEHÍCULOS.

El hidrógeno probablemente pueda sustituir al petróleo en un futuro. Los combustibles fósiles contaminan, son caros y se acaban. El panorama energético actual presenta dos problemas bien conocidos: el agotamiento de los recursos no renovables y la contaminación ambiental relacionada con el quemado de los combustibles fósiles. Más del 98% del transporte por carretera depende del petróleo. Estos problemas motivan la búsqueda de fuentes de energía perdurables y limpias que, junto con otras medidas como el ahorro y la eficiencia en el proceso de producción y consumo de energía y el desarrollo de sistemas generalizados de acumulación de energía limpios, solucionen el abastecimiento energético a medio y largo plazo.

Las fuentes de energía renovables y limpias; tal como la energía eólica, fotovoltaica,...están sometidas a las condiciones de intermitencia propias de los fenómenos naturales, por lo que, para que su aplicación sea universal es preciso disponer de un buen sistema de almacenamiento de los excedentes de energía.

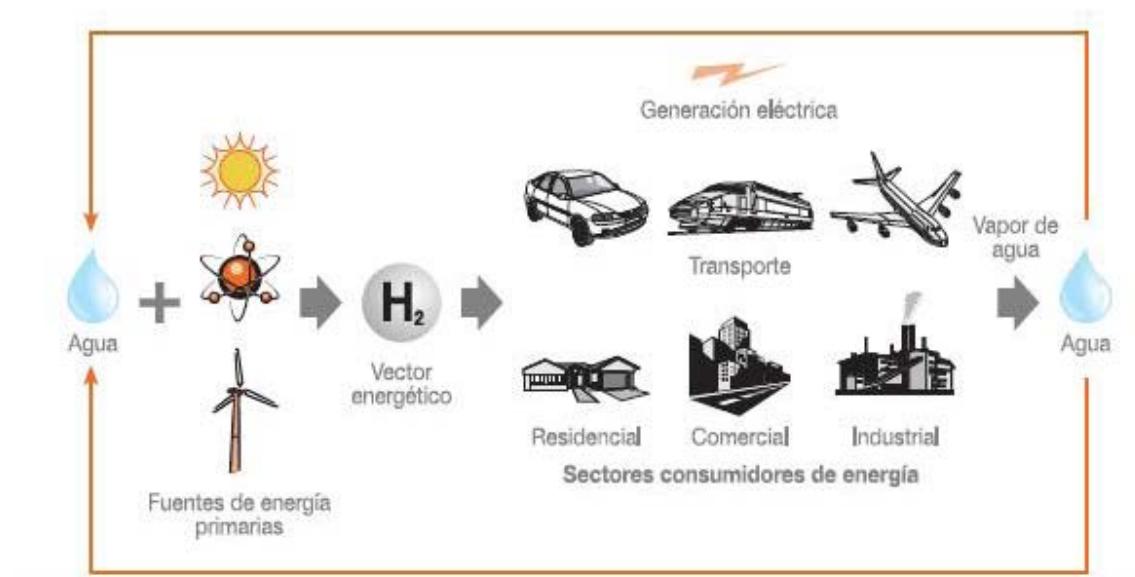


Fig. 1. Fuentes de energía primaria y posibles usos del  $H_2$ .

El hidrógeno es el elemento más básico y abundante en la naturaleza, y su combustión es totalmente limpia. El problema es que no se encuentra aislado, y su producción requiere consumo de energía (Fig.1). Existen varios métodos para la producir hidrógeno. La producción a partir de hidrocarburos no parece una solución a largo plazo, ya que no solucionaría el problema de agotamiento de recursos naturales. Por otro lado, las Energías Renovables tienen una ventaja, su recurso es inagotable.

Los métodos más utilizados para la obtención de hidrógeno son el reformado de hidrocarburos y la electrólisis del agua (Fig.2).

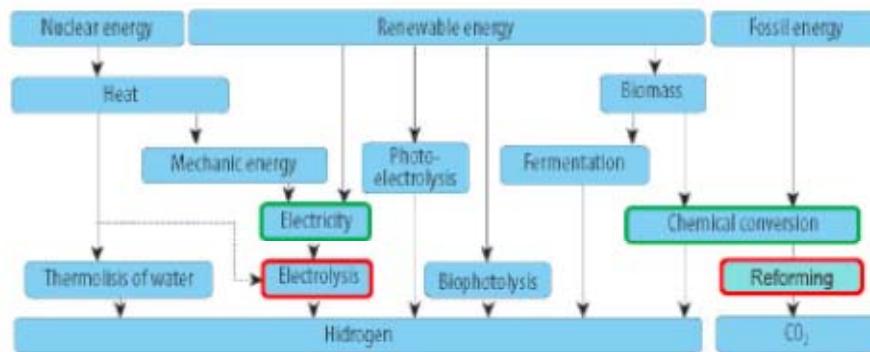


Fig.2. Esquema de los distintos procesos para la producción de H<sub>2</sub>. Fuente: **Asignatura Pilas de combustible y sus aplicaciones. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**

El 96% del hidrógeno requiere como energía primaria combustibles fósiles (48% aproximadamente es producido a partir de Gas Natural (**Kirtay Elif, 2011**) (Fig.3). El 95% de la producción es “cautiva”, es decir, se produce para consumo propio de las industrias que lo demandan.

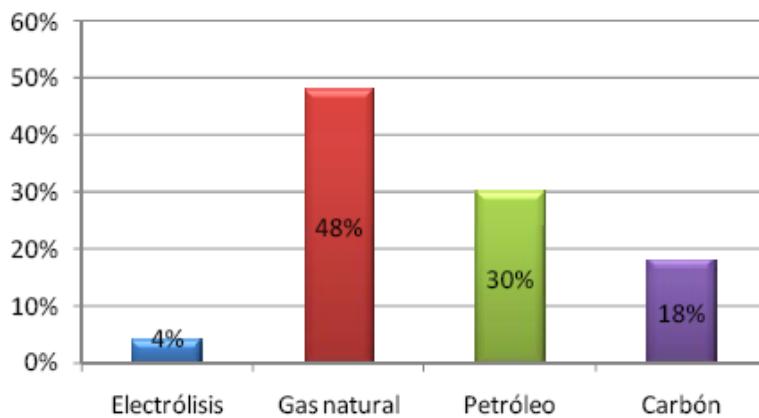


Fig.3. Origen del H<sub>2</sub> producido en la actualidad (**Kirtay Elif, 2011**).

En la siguiente figura (Fig.4) se muestra la tendencia futura acerca de los procesos de producción de hidrógeno.

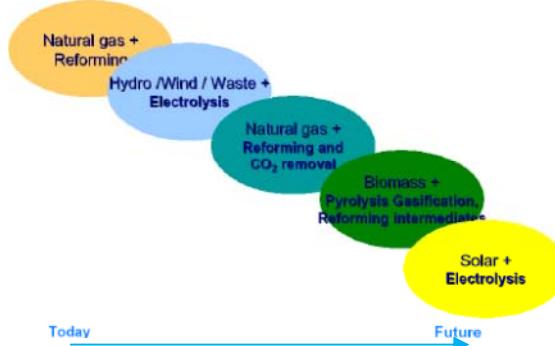


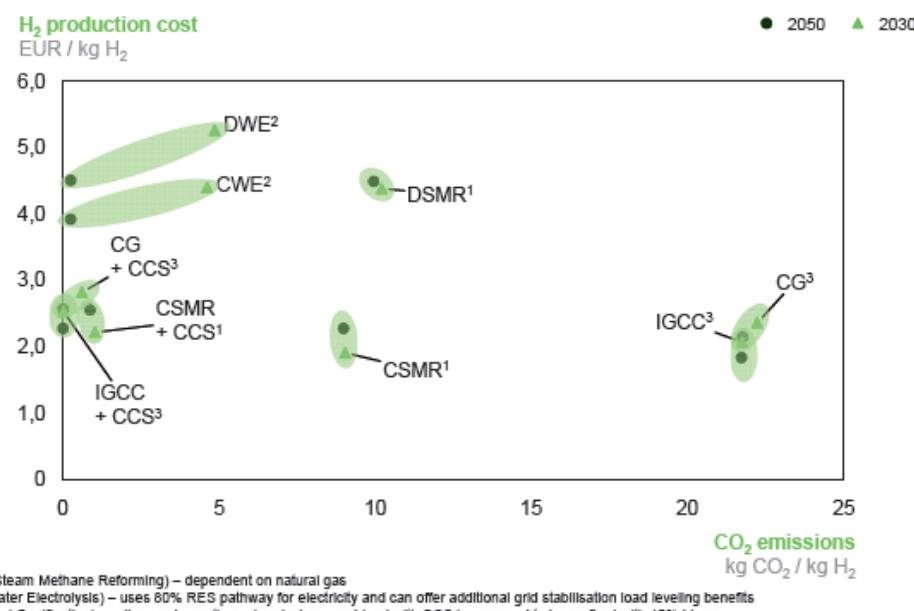
Fig.4. Tendencia futura de producción de H<sub>2</sub>. Fuente: **Asignatura Pilas de combustible y sus aplicaciones. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**

Según el estudio llevado a cabo por McKinsey & Company (**McKinsey & Company, 2011**) hay una gran variedad de tecnologías disponibles para producir hidrógeno con emisión cero de CO<sub>2</sub>, incluyendo los combustibles fósiles, la electricidad renovable, la nuclear y la biomasa.

Los métodos de producción futura más eficaces económicamente utilizan tecnologías ya existentes (reformado de metano con vapor y gasificación de carbón).

Los costes de las tecnologías existentes, tales como el reformado de metano con vapor (SMR) y la gasificación de carbón, se incrementaran debido al aumento de los precios del combustible y a los costes de la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS).

El coste de los electrolizadores de agua se reduce debido a la mejora en la eficiencia. El hidrógeno puede producirse a un coste razonable tanto a gran como a pequeña escala, desde 0,4 a 1.000 toneladas al día, mediante producción centralizada o descentralizada. En la siguiente figura (*Fig.5*) se muestra el coste de producción de hidrógeno para distintas tecnologías utilizadas.



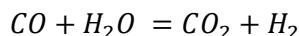
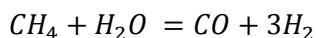
*Fig.5. Coste de producción de hidrógeno en función de la tecnología utilizada y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. (Fuente: **McKinsey & Company, 2011**).*

Según expertos que han contribuido en el proyecto HyWAYS, en un principio el hidrógeno en España provendrá de la industria química y del reformado con vapor del gas natural para su aplicación en vehículos. A partir del año 2020, se prevé una producción masiva a partir de la gasificación de carbón nacional (con captura de CO<sub>2</sub>) y electrólisis a partir de energía eólica y solar de alta temperatura (**IDAЕ, Asociación Española del Hidrógeno, 2008**).

### 6.1. Producción de H<sub>2</sub> mediante reformado con vapor de agua.

Dentro de los procesos de producción de H<sub>2</sub> mediante conversión química, se encuentra el reformado con vapor de agua que es el proceso más habitual. Este proceso se realiza a alta temperatura y presión moderada. Este proceso se divide en distintas etapas: purificación, reformado, desplazamiento de CO y depuración. La etapa de purificación se lleva a cabo para evitar que los catalizadores utilizados en el reformado se envenenen con ciertos elementos presentes en trazas. El proceso de reformado se utiliza para producir gas de síntesis: CO + H<sub>2</sub>. En la última fase se separa el H<sub>2</sub> del resto de los gases.

Las reacciones que tienen lugar en el reformado de metano con vapor de agua son:



El hidrógeno se obtiene haciendo pasar la mezcla de gases a través de medios de separación (membranas o lechos absorbentes de tipo PSA (Pressure Swing Adsorption)).

### 6.2. Producción de H<sub>2</sub> mediante gasificación.

La reacción del carbón con vapor de agua produce gas de síntesis (mezcla de H<sub>2</sub> con CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros compuestos). En esta gasificación, si se aumenta la temperatura por encima de 1000 °C la proporción de H<sub>2</sub> y CO aumenta (**Energía y cambio climático**). El CO resultante puede volver a reaccionar con el vapor de agua y producir más hidrógeno. Al igual que ocurría con el reformado es necesario utilizar medios de separación físicos para obtener el H<sub>2</sub>.

Cuando se habla de procesos de gasificación no solamente hay que pensar en la producción de hidrógeno a partir de carbón, sino que también se puede utilizar el proceso de gasificación para obtener hidrógeno a partir de biomasa (se ve a continuación).

### 6.3. Producción de H<sub>2</sub> mediante Electrólisis del agua.

La producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua consiste en la ruptura de la molécula de agua en sus componentes elementales, hidrógeno y oxígeno, por acción de una corriente eléctrica. Las ventajas de la electrólisis son que es el único proceso que no necesita depender de combustibles fósiles (si la electricidad utilizada procede de una fuente renovable), obteniéndose un producto final de alta pureza, y siendo factible en un amplio rango de escalas.

El dispositivo utilizado para realizar la electrólisis del agua es una cuba electrolítica, que consta de una serie de células, cada una con un electrodo positivo y otro negativo.

Los electrodos se sumergen en un electrolito (agua eléctricamente conductora, agregando los iones del hidrógeno, generalmente bajo la forma de hidróxido alcalino de potasio, KOH) para facilitar la migración de los iones.

El ánodo (electrodo positivo) es generalmente de níquel y cobre y está recubierto con óxidos de metales como manganeso, tungsteno y rutenio.

El cátodo (electrodo negativo) es generalmente de níquel, revestido con pequeñas cantidades de platino como catalizador. Sin el catalizador, el hidrógeno activo se acumularía en el electrodo y bloquearía el flujo.

El separador de gas o diafragma se utiliza para evitar que se mezclen el hidrógeno y el oxígeno, aunque permite el paso libre de iones. Está fabricado generalmente de un material basado en el asbesto y tiende a romperse cuando se somete a una temperatura a partir de 80°C.

La demanda eléctrica requerida para la electrólisis se va reduciendo a medida que aumenta la temperatura a la que tiene lugar la electrolisis.

En los siguientes apartados se va a analizar la producción de H<sub>2</sub> a partir de distintas fuentes de energías renovables.

#### **6.4. Producción de H<sub>2</sub> a partir de energía solar.**

Actualmente se conocen dos procedimientos para la producción de hidrógeno a partir de radiación solar, ambos se encuentran en fase de investigación:

- Procesos fotobiológicos. En estos procesos se utilizan organismos (algas verdes, cianobacterias, bacterias fotosintéticas y bacterias de fermentación oscura) como catalizadores para producir hidrógeno a partir de agua.
- Procesos fotoelectroquímicos. En estos procesos se obtiene hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, utilizando para ello la luz solar.

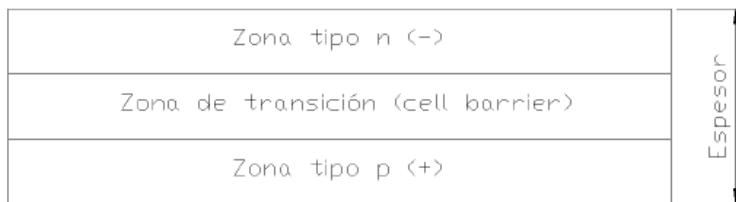
#### **6.5. Producción de H<sub>2</sub> a partir de energía solar-fotovoltaica.**

En este caso se produce energía eléctrica directamente a partir de la energía solar, para ello se utilizan células solares, las cuales permiten obtener energía eléctrica de forma continua a partir de la energía lumínica que proviene del Sol, este proceso de transformación tiene lugar gracias al efecto fotovoltaico.

Para conseguir dicha transformación, las células solares están constituidas por materiales semiconductores, en los que se ha creado de forma artificial mediante un proceso de dopado con otras sustancias un campo eléctrico constante, dando lugar a la unión p-n.

El material semiconductor que se utiliza habitualmente es el Silicio (puede ser dopado mediante otros elementos como el Fosforo, Boro o Antimonio) aunque existen tecnologías fotovoltaicas que prescinden de él.

Al dopar las células fotovoltaicas del material semiconductor se consigue tener una capa de semiconductor denominada “n” (carga negativa) y otra capa denominada “p” (carga positiva) (*Fig.6*).



*Fig.6. Zonas de una célula fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.*

Para realizar el dopado se necesitan elementos químicos que den lugar a tener exceso de electrones (carga negativa) en la zona n y excesos de huecos (carga positiva) en la zona p.

La cara tipo n es la que se expone a la radiación solar, cuando llega un fotón a dicha zona que tiene exceso de electrones comunica la energía necesaria para generar flujo de huecos hacia la zona positiva y flujo de electrones hacia la zona negativa. Este desequilibrio crea una diferencia de potencial entre las dos caras de la célula, si ambas caras están conectadas a una carga mediante cables conductores tendrá lugar un flujo de corriente eléctrica desde la cara n a la cara p.

En el mercado hay distintos tipos de módulos fotovoltaicos. En función del proceso de fabricación utilizado se pueden diferenciar en dos tipos: módulos cristalinos y módulos de capa fina. En el caso de los módulos cristalinos la construcción del módulo se realiza por medio de la unión eléctrica de células fotovoltaicas (en serie y/o en paralelo). Y tienen una eficiencia de un 15%. En el caso de los módulos de capa fina, se fabrican con un menor espesor de material fotovoltaico, consiguiendo un menor aporte de material y un proceso de fabricación que demanda menos energía. Su principal inconveniente es su menor eficiencia (8 %). En cuanto al aspecto de los módulos, el color depende de la tecnología de capa fina. Lo que es común a todas ellas es que todo el módulo está ocupado por zona de captación al contrario que los cristalinos.

## 6.6. Producción de H<sub>2</sub> a partir de energía eólica.

Las fuentes de energía renovables están emergiendo como alternativa sólida para cubrir las necesidades actuales energéticas. Entre todas las fuentes de energía renovables existentes (solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, solar térmica, biomasa,

eólica, hidráulica, etc.), la más desarrollada a escala nacional es la eólica, con la que se llegó a cubrir el 50% del total de la demanda eléctrica nacional el 8/11/2009, unos 11.546 MW, y que habitualmente cubre un 14% del total con una potencia instalada de 16.760 MW según la **Red Eléctrica Española**, aunque la cifra a 2011 esta próxima a 20.000 MW.

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire y que es transformada en otro tipo de energía para las actividades humanas. En la actualidad, la energía eólica se utiliza para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde.

#### 6.7. Producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa.

La producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa se puede llevar a cabo mediante procesos termoquímicos (reformado, pirolisis y gasificación) o mediante procesos biológicos (fermentación alcohólica y digestión anaeróbica).

Se considera biomasa a la materia orgánica que se produce a través del proceso de la fotosíntesis, así como a la originada en los procesos de transformación de esta materia orgánica, considerando tanto los procesos que se producen de forma natural como de forma artificial.

Hay distintos tipos de biomasa que se pueden clasificar según su composición (azucarada, amilácea o lignocelulósica) y según su origen (biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos).

Los procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno por general, se utilizan en sistemas centralizados. Presentan una eficiencia entre el 42-72%, con un coste de producción de 100 €/MWh, habiéndose demostrado una producción por gasificación de 100 a 400 toneladas/día y estando la pirolisis en un estadio comercial (**Asignatura Pilas de combustible y sus aplicaciones. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Los retos a resolver en la gasificación y pirolisis se refieren al pretratamiento de la biomasa, la retirada de cenizas y la limpieza de gas de síntesis.

Los procesos biológicos se utilizan en sistemas descentralizados, siendo más lentos y costosos que los termoquímicos. El reformado de combustibles líquidos obtenidos a partir de fermentación alcohólica presenta ventajas de disponibilidad y bajo coste de la materia prima (el coste de producción del hidrógeno depende en gran medida de este factor), aceptable durabilidad de los catalizadores y tolerancia a las impurezas, siendo necesario el control de la cinética de la reacción mediante catalizadores para evitar la formación de alcanos y metano.

La gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa. Dos tipos de biomasa se pueden utilizar como

materia prima para la producción de hidrógeno: los cultivos bioenergéticos y los residuos que son menos costosos, como residuos de cultivo agrícola o residuos de la transformación de la madera (residuos de biomasa). El hidrógeno se puede obtener a partir de del vapor de gasificación de paja de leguminosas, de serrín de pino, de cáscara de avellana, de astillas de pino, de paja de trigo y de residuos de madera (**Kirtay Elif, 2011**).

#### 6.8. Análisis del H<sub>2</sub> necesario para alimentar a la flota actual de vehículos en España y análisis de la forma de producirlo.

El parque nacional de turismos en España a 31 de diciembre de 2011 era de 22.277.244, último dato publicado por la Dirección General de Tráfico (**Dirección General de Tráfico, 2011**). Se ha calculado los kilogramos de hidrógeno necesarios al año para alimentar toda la flota de turismos nacional si los mismos funcionasen con hidrógeno. Para ello se ha supuesto un consumo de 0,95 kg de H<sub>2</sub>/100 kilómetros, consumo del Hyundai ix35 fuel cell (**Hyundai, 2013 (3)**), y un recorrido de 12.000 kilómetros al año (**McKinsey & Company, 2011**).

$$22.277.244 \text{ vehículos} \times 12.000 \frac{\text{km}}{\text{año vehículo}} = 2,673 \times 10^{11} \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

$$2,673 \times 10^{11} \frac{\text{km}}{\text{año}} \times \frac{0,95 \text{ kg H}_2}{100 \text{ km}} = 2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$$

Por lo tanto, se necesita producir  $2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$  para alimentar a la flota nacional de turismos.

El siguiente paso es calcular la cantidad de energía necesaria para producir un kilogramo de H<sub>2</sub> a 25 °C y 1 atm.



$$\Delta G = 237 \text{ kJ/mol H}_2$$

$$P_{mol}(\text{H}_2) = 2,0158 \text{ kg H}_2/\text{kmol H}_2$$

$$237 \frac{\text{kJ}}{\text{mol H}_2} \times \frac{10^3 \text{ mol H}_2}{2,0158 \text{ kg H}_2} = 117,57 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2} = 32,65 \frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2} = E_{rev}$$

E<sub>rev</sub> es el potencial de descomposición ideal.

Si se considera un 20% de pérdidas de calor debida a la resistencia eléctrica del electrolito:

$$E_{real} = E_{rev} + \text{Pérdidas}$$

$$E_{real} = 32,65 \frac{kWh}{kg H_2} \times (1 + 0,20) = 39,18 \frac{kWh}{kg H_2}$$

Por lo tanto, la energía necesaria para producir todo el hidrógeno necesario para alimentar a la flota de turismos nacional, es  $99,478 \times 10^9 \frac{kWh}{año}$ .

$$2,539 \times 10^9 \frac{kg H_2}{año} \times 39,18 \frac{kWh}{kg H_2} = 99,478 \times 10^9 \frac{kWh}{año}$$

Si se considera un rendimiento del electrolizador de un 65%, la energía necesaria para producir todo el hidrógeno requerido para alimentar a la flota de turismos nacional es de  $1,53 \times 10^{11} \frac{kWh}{año}$ .

$$\frac{99,478 \times 10^9 \frac{kWh}{año}}{0,65} = 1,53 \times 10^{11} \frac{kWh}{año}$$

Si se tiene en cuenta la energía necesaria para que el  $H_2$  esté en el dispensador, hay que presurizarlo, se asume que se necesita un 15% del contenido energético del  $H_2$  (**Energía y cambio climático**).

$$PCI (H_2) = 120 \frac{MJ}{kg H_2}$$

$$PCI (H_2) = 33,3 \frac{kW h}{kg H_2}$$

$$0,15 \times 33,3 \frac{kW h}{kg H_2} = 4,995 \frac{kWh}{kg H_2} \text{ Necesario para presurizar el } H_2$$

$$4,995 \frac{kW h}{kg H_2} \times 2,539 \times 10^9 \frac{kg H_2}{año} = 1,268 \times 10^{10} \frac{kW h}{año}$$

$$1,53 \times 10^{11} \frac{kW h}{año} + 1,268 \times 10^{10} \frac{kW h}{año} = 1,6568 \times 10^{11} \frac{kW h}{año}$$

Por lo tanto, la energía necesaria para producir todo el  $H_2$  requerido para alimentar a la flota nacional de turismos son  $1,6568 \times 10^{11} \frac{kW h}{año}$ .

Una vez conocido este dato, si se tiene en cuenta los datos de producción nacional de energía eléctrica en el año 2011 (**Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2011**) se observa que durante este año se produjo un total de 42.007 GWh mediante energía eólica, un total de 7.019 GWh con energía fotovoltaica y un total de 1.777 GWh con

energía termosolar. Por lo tanto se concluye que la energía renovable que podría cubrir la demanda de energía para alimentar a la flota nacional de turismos, si éstos fuesen vehículos de pila de combustible, sería la energía eólica ya que multiplicando por cuatro su producción actual se obtendrían los 165.680 GWh necesarios. Mientras que si se utilizase energía fotovoltaica habría que multiplicar su producción por 24 y si se utilizase energía termosolar habría que multiplicar su producción por 93, algo que material y económicamente imposible.

También se plantea la producción de hidrógeno a partir de biomasa, ya que es uno de los métodos de producción más baratos (**Balat Haava, Kirtay Elif, 2010**). La gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa.

En el estudio llevado a cabo por **Moreno J. y Dufour J. (2013)** se determina la viabilidad ambiental de cuatro residuos lignocelulósicos españoles (poda de vid, poda de almendro y residuos forestales de plantaciones de pino y de eucalipto) para la producción de hidrógeno mediante gasificación. De este estudio se obtienen los siguientes datos:

- Por cada 1,32 kg de residuo de pino se obtiene 0,26 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> (0,0233 kg de H<sub>2</sub>).
- Por cada 1,11 kg de residuo de eucalipto se obtiene 0,18 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> (0,016 kg de H<sub>2</sub>).
- Por cada 1,44 kg de poda de almendro se obtiene 0,31 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> (0,027 kg de H<sub>2</sub>).
- Por cada 1,01 kg de poda de vid se obtiene 0,26 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> (0,0233 kg de H<sub>2</sub>).

Con este dato de producción de hidrógeno a partir de diferentes tipos de biomasa, conocida la producción de biomasa por hectárea y conocida la cantidad de hidrógeno necesaria para alimentar la flota de turismos nacional ( $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$ ), permitirá calcular las hectáreas que se necesitan para producir esa cantidad de hidrógeno, de esta manera se sabrá si es viable la producción de hidrógeno a partir de biomasa para alimentar a toda la flota de turismos.

La producción de residuo de pino por hectárea es de 2379 kg de poda/hectárea (**Agencia Andaluza de la Energía, 2011**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesita  $1,1438 \times 10^{11}$  kg de residuo de pino y teniendo en cuenta la producción por hectárea, harían falta 60.462.523 hectáreas de pino. Si se tiene en cuenta las hectáreas que hay de pino actualmente, considerando el pino carrasco (*Pinus halepensis*), el pino pináster (*Pinus pinaster*), el pino silvestre (*P. sylvestris*) y el pin laricio (*P. nigra*), unas 4.650.000 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2)**), habría que multiplicar por 13 las hectáreas actuales para tener la biomasa necesaria para producir el hidrógeno que podría alimentar a la flota nacional de turismos.

La producción de residuo de eucalipto por hectárea es de 2792 kg /hectárea (**Agencia Andaluza de la Energía, 2011**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$  se necesita unos  $1,76 \times 10^{11}$  kg de residuo de eucalipto y teniendo en cuenta la producción por hectárea, harían falta 63.037.249 hectáreas de eucalipto. Si se tiene en cuenta las hectáreas que hay de eucalipto actualmente, 640.000 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2)**), habría que multiplicar por 98 las hectáreas actuales para tener la biomasa necesaria para producir el hidrógeno que podría alimentar a la flota nacional de turismos.

La producción de poda de almendro por hectárea es de 300 kg/hectárea (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$  se necesita unos  $1,35 \times 10^{11}$  kg de poda de almendro y teniendo en cuenta la producción por hectárea, harían falta 451.377.778 hectáreas de almendros. Si se tiene en cuenta que actualmente hay 571.183 hectáreas de almendros (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1)**), haría falta multiplicar por 790 las hectáreas actuales para tener la superficie necesaria para obtener el hidrógeno requerido para alimentar a la flota completa, por lo que no es muy viable esta opción.

La producción de poda de vid por hectárea es de 800 kg/hectárea (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**). Para producir  $2,539 \times 10^9 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$  se necesita unos  $1,10 \times 10^{11}$  kg de poda de vid y teniendo en cuenta la producción por hectárea, harían falta 137.574.571 hectáreas de vid. Si se tiene en cuenta que actualmente hay 967.055 hectáreas de viñedo (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1)**), haría falta multiplicar por 142 las hectáreas actuales para obtener la superficie necesaria para obtener el hidrógeno requerido para alimentar a la flota nacional de turismos. Esta opción mejora a la anterior pero aún así hace falta mucha superficie.

Por lo tanto se concluye que de todas los tipos de biomasa analizados el más apropiado para producir la cantidad de hidrógeno necesario para alimentar a la flota nacional de turismos, si estos fuesen turismos de pila de combustible, serían los residuos de pino dado que existen muchas hectáreas para cubrir la necesidad.

Se plantea el utilizar un cultivo energético, este tipo de cultivo tiene la única finalidad de producir materia prima transformada en combustible (biomasa), bien para ser destinada a la automoción o bien para producir calor y/o energía eléctrica. Tiene como premisa fundamental la obtención, de forma rentable, de la máxima cantidad neta posible de energía. Interesa que sean especies vivaces, con capacidad rebrotadora. De este modo la técnica de obtención de altas productividades de biomasa consiste en aprovechar la capacidad de rebrote. Escogiendo como cultivo energético el chopo, se podría considerar una producción de 12-17 toneladas de materia seca/hectárea y año (**Asignatura Biomasa. Máster Universitario en Energía Renovables y Eficiencia Energética**).

Del estudio llevado a cabo por **Susmozas A. et al (2013)** se obtiene que por cada 36,28 kg de chopo se obtiene 1 kg de hidrógeno. De este modo para obtener  $2,539 \times 10^9 \frac{kg\ H_2}{año}$  se necesitan  $9,2 \times 10^{10}$  kg de chopo. Si se tiene en cuenta la producción por hectárea, consideramos unas 15 toneladas/hectárea, harían falta 6.134 hectáreas de chopo. El número de hectáreas es mucho más reducido que para los casos analizados anteriormente, esto es debido a que por tratarse de un cultivo energético su productividad es mucho más elevada. Si tenemos en cuenta la superficie de cultivo de chopo en el año 2010, 137.192 hectáreas (**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2010 (3)**), se comprueba que es posible producir los kilogramos de chopo necesarios para producir la cantidad necesaria de hidrógeno para abastecer a la flota nacional de turismo.

Por lo tanto se concluye que mediante la utilización de cultivos energéticos se podría generar el hidrógeno necesario para abastecer a la flota nacional de turismos, en el caso de que fuesen vehículos de pila de combustible.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Agencia Andaluza de la Energía. La biomasa en Andalucía. 2011.

Balat Haava, Kirtay Elif. Hydrogen from biomass e Present scenario and future prospects. International journal of hydrogen energy 35 (2010) 7416-7426.

Dirección General de Tráfico, 2011.

[http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seuridad\\_vial/estadistica/parque\\_vehiculos/series\\_historicas\\_parque/series\\_historicas\\_parque\\_vehiculos.pdf](http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seuridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/series_historicas_parque_vehiculos.pdf)

Energía y cambio climático. SET-TE: producción de hidrógeno.

[http://www.energiaycambioclimatico.com/export/sites/foro/resources/pdf/programa\\_investigacion/investigacion/101126\\_SET-TE\\_H2.pdf](http://www.energiaycambioclimatico.com/export/sites/foro/resources/pdf/programa_investigacion/investigacion/101126_SET-TE_H2.pdf)

Hyundai, 2013 (3). [http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas\\_prensa\\_no-n\\_v\\_marcas/hyundai/doc\\_ix35\\_fuel\\_cell\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S012013/doc/notas_prensa_no-n_v_marcas/hyundai/doc_ix35_fuel_cell_es.pdf)

IDAE, Asociación Española del Hidrógeno, 2008. ¿A partir de qué fuentes de energía se obtendrá el Hidrógeno?

IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera). Aprovechamientos Energéticos de Cultivos Leñosos. 2009.

[http://www.uhu.es/6jornadasforestales/descargas/pdf/ArmandoMartinez\\_AprovEnergeticos.pdf](http://www.uhu.es/6jornadasforestales/descargas/pdf/ArmandoMartinez_AprovEnergeticos.pdf)

Kirtay Elif. Recent advances in production of hydrogen from biomass. Energy Conversion and Management 52 (2011) 1778-1789.

LBST.“Prospectiva Alternativa Mundial de Energía 2005”.

McKinsey & Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe a fact-based analysis.The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012 (1).

[http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/00ESPAÑA\\_tcm7-234252.PDF](http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/00ESPAÑA_tcm7-234252.PDF)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011 (2).

[http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/IEPNB\\_2011\\_19marzo\\_tcm7-264661.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/IEPNB_2011_19marzo_tcm7-264661.pdf)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2010 (3).

[http://www.magrama.gob.es/ca/ministerio/servicios/publicaciones/H\\_Agricultura\\_tcm8-164933.pdf](http://www.magrama.gob.es/ca/ministerio/servicios/publicaciones/H_Agricultura_tcm8-164933.pdf)

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. La Energía en España 2011.

Moreno J., Dufour J. Life cycle assessment of hydrogen productionfrom biomass gasification. Evaluation of different Spanish feedstocks. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 7616-7622.

Red Eléctrica Española. <http://www.ree.es/>

Susmozas Ana, Iribarren Diego, Dufour Javier. Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 9961-9972.