

COLEGIO UNIVERSITARIO DE ESTUDIOS FINANCIEROS

GRADO EN ADE

TRABAJO FIN DE GRADO



SECTOR ENERGÉTICO

HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE. PERSPECTIVAS DE FUTURO EN EL TRANSPORTE

Autor: de la Torre Iglesias-Sarria, Pablo

Tutor: Tormo García, Luis Carlos

Madrid, abril de 2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. SECTOR ENERGÉTICO	4
3. EVOLUCIÓN	5
4. ¿POR QUÉ EL HIDRÓGENO?	10
3.1 ¿Dónde está?	11
3.2 ¿Cómo se obtiene?	12
3.3 Antecedentes del hidrógeno	14
5. PILAS DE COMBUSTIBLE	15
6. USOS DEL BINOMIO HIDRÓGENO – PILA DE COMBUSTIBLE	16
5.1 Hidrógeno en la industria	17
5.2 Combustible para el transporte	18
5.3 Generación de energía distribuida	19
5.4 Almacenamiento energético	20
7. POSICIONAMIENTO DEL BINOMIO HIDRÓGENO – PILA DE COMBUSTIBLE	21
6.1 Japón	21
6.2 Europa	23
6.3 Estados Unidos	25
8. PERSPECTIVAS DE FUTURO EN EL TRANSPORTE	26
7.1 Precio de venta	27
7.2 Estaciones de servicio de hidrógeno	29
7.3 Comparativa de repostaje y autonomía	31
7.4 Coste de combustible en un año	32
9. CONCLUSIÓN	33
10. BIBLIOGRAFÍA	35
ÍNDICE DE GRÁFICOS	37
ÍNDICE DE TABLAS	37
ÍNDICE DE FIGURAS	37

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas se viene investigando sobre diferentes alternativas de energía que suplementen o reduzcan el consumo de combustibles fósiles, especialmente en el sector del transporte, debido a su escasez y alta contaminación.

En el trabajo se presenta al hidrógeno como la solución a este problema debido a su limpieza, potencialidad y energéticamente hablando es inagotable. No obstante, el hidrógeno no es una fuente de energía primaria sino un vector energético; es decir, una fuente de almacenamiento y transporte de energía. Entre sus usos destaca el de ser combustible, pudiendo así ser utilizado en el sector del transporte.

Las pilas de combustible actúan como si de un motor se tratase convirtiendo la energía presente en el hidrógeno en electricidad y calor. Éstas generan energía eléctrica de forma continua siempre que se les esté suministrando este compuesto.

El hidrógeno unido a las pilas de combustible tiene diferentes usos en nuestras vidas. La gran mayoría de países, o regiones, se encuentran desarrollando estrategias de implementación de este binomio en diferentes ámbitos. Lo que hace tan atractivo a este binomio es la emisión de vapor de agua como único residuo.

Este gas se presenta como el combustible del futuro para el sector del transporte. Sector que consume casi la mitad de la energía final en España, procedente la mayor parte de combustibles fósiles.

A través de la utilización del hidrógeno como combustible y las pilas de combustible como medio para producir electricidad que alimenta a un motor, se da lugar al vehículo de pila de combustible. Éste, es una gran alternativa a los diferentes tipos de vehículos existentes como se podrá apreciar al final del trabajo.

2. SECTOR ENERGÉTICO

El sector energético engloba todas aquellas actividades relacionadas con la extracción, transformación y distribución de la energía para el futuro consumo de esta en distintos ámbitos de nuestras vidas.

La extracción se centra en desempeñar actividades mineras; de obtención de los recursos naturales o primarios, como el carbón, petróleo, etc. Por otro lado, nos encontramos con la transformación de esos recursos primarios energéticos en electricidad por medio de refinerías, centrales o plantas de gas. Por último, las actividades de transporte y distribución de tanto las materias primas inicialmente extraídas como de los productos finales transformados en electricidad.

Dentro del sector energético podemos llevar a cabo una clasificación de la energía por combustibles y otra según la procedencia de la energía. En cuanto a la clasificación por combustibles nos encontramos con los subsectores del carbón, petróleo, gas natural y eléctrico. Este último también engloba a la energía nuclear y a la mayoría de las energías renovables.

Por otro lado, la energía se puede clasificar en energía primaria o energía secundaria según la procedencia de esta. La energía primaria es aquella que podemos encontrar en estado puro en la naturaleza y la cual no hay que someter a ningún proceso de transformación para su uso. Dentro de este grupo podemos diferenciar los combustibles fósiles y las energías renovables. Los combustibles fósiles tales como el carbón, petróleo, gas natural, son una fuente de energía escasa puesto que tardan miles de años en generarse y el consumo de estos supera el periodo de generación de nuevos. Lo que en un futuro no muy lejano va a llevar a su agotamiento. Las energías renovables; el agua, el sol, el viento, están disponibles en la naturaleza en mayor o menor medida, dependiendo de la situación geográfica, con una gran perspectiva de futuro debido al potencial agotamiento de la otra fuente de energía primaria. La energía secundaria se obtiene de la transformación de la energía primaria en electricidad por medio de turbinas, centrales térmicas de tipo nuclear, centrales hidroeléctricas, etc.

Esta energía que extraemos de la naturaleza, energía primaria, y o convertimos en electricidad, energía secundaria, tiene un uso amplio en nuestras vidas como se puede apreciar en el siguiente gráfico.

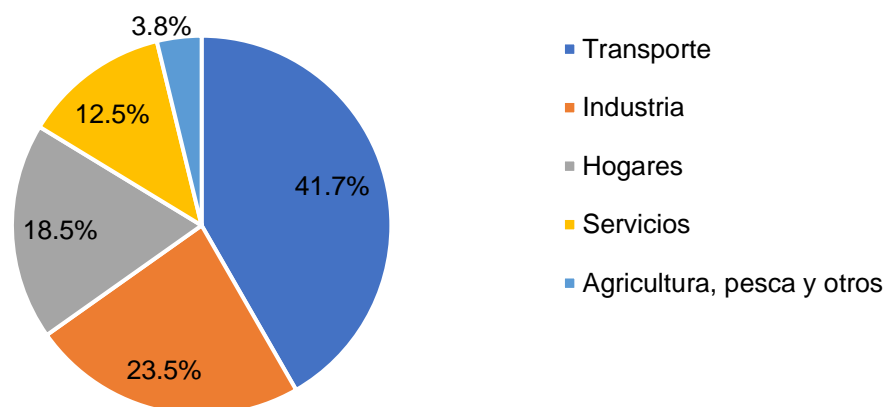


Gráfico 1 – Consumo de energía final por sectores en España, 2015

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recogidos en informe *La Energía en España 2016*

La mayor parte de la energía final es consumida en el sector del transporte, representando el 41,7% del total nacional. Al representar casi la mitad del consumo de energía total a nivel nacional es en este sector en el cual nos queremos centrar.

3. EVOLUCIÓN

La evolución del sector energético está estrechamente relacionada con el proceso de industrialización de los países debido a que requiere de *inputs* energéticos para llevarse a cabo.

El sector energético toma una gran importancia a mediados del siglo XVIII cuando se utilizó el carbón para producir energía mecánica y crear así la máquina de vapor. Este proceso, conocido como la industrialización, comenzó en Inglaterra (1760-1840) y se ha ido extendiendo al resto del mundo. Esto quiere decir que el incremento de consumo de energía está directamente relacionado con el nivel de desarrollo de los países (García Delgado, 2017).

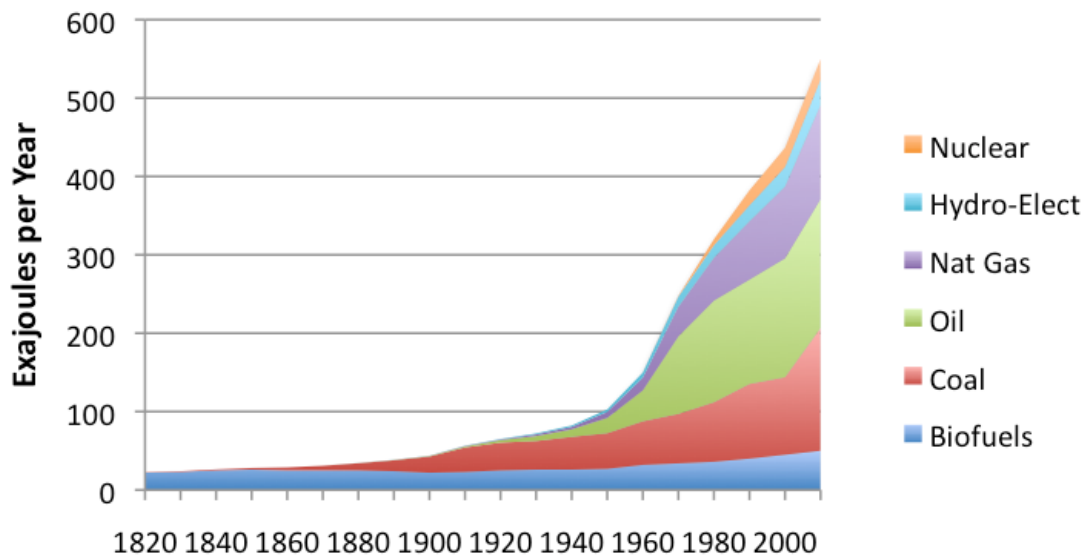


Gráfico 2 – Energía consumida en el mundo por fuente de energía entre 1820 – 2010

Fuente: sitio web *Our Finite World*

El Gráfico 2 muestra el consumo de energía a nivel mundial desde 1820 hasta el año 2010, llevando a cabo una segmentación por fuente de energía. Es de mencionar el crecimiento pronunciado que se produce en la segunda mitad del siglo XX, como consecuencia, por un lado, de la industrialización y desarrollo de un gran número de países debido a la incorporación de la energía a sus procesos de producción, comunicación y distribución. Por otro lado, este crecimiento también se debe al aumento de población a nivel mundial. En el año 1950 la tierra tenía 2.500 millones de habitantes y hoy en día somos alrededor de 7.300 millones. Por lo que el aumento de población está directamente relacionado con el aumento de consumo de energía. Además, se espera que en el año 2050 nos acerquemos a los 9.500 millones de habitantes (Mártel, 2016).

Combustibles	1980	1990	2000	2010
Petróleo	38400	40000	45500	47400
Gas Natural	15800	22000	27100	33000
Carbón	20500	26100	27400	41600
Nuclear	2200	6000	7500	8000
Renovables	5200	7000	8700	18000
TOTALES	82100	101100	116200	148000
% Combustibles fósiles	91%	87%	86%	82%

Tabla 1 – Energía consumida en el planeta (TWh) en las décadas de 1980 a 2010

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en artículo *¿Para cuando el final de los combustibles fósiles?*

La Tabla 1 refleja un aumento del consumo de energía para cada una de las fuentes representadas. Sin embargo, no todas evolucionan de la misma manera. Destacamos las energías renovables las cuales aumentan su consumo en el año 2010 mas del doble, comparado con el año anterior. También es de señalar que los combustibles fósiles siguen aumentando, pero representan un menor porcentaje del total año tras año. Lo que significa que vamos reduciendo la dependencia de este tipo de fuente de energía.

El consumo de energía que se representa en la tabla tiene un reparto muy desigual en el mundo. Esto se debe a que el 25% de la población, los que se habitan en países industrializados, consumen el 60% de la energía total (Mártel, 2016).

Como se puede apreciar, la mayor parte de la energía consumida en los últimos años es procedente de combustibles fósiles (Tabla 1); petróleo, gas natural y carbón. Esta fuente de energía presenta dos grandes problemas: son recursos limitados y son grandes contaminantes.

Como hemos mencionado anteriormente, esta fuente de energía es limitada debido a que se consume a un ritmo muy superior del que se produce. Un dato revelador: “en un año el ser humano consume lo que la naturaleza ha tardado un millón de años en producir” (Quiroga Martínez, 2017). Si seguimos así, se prevé que en 100 años hayamos agotado todas las reservas de petróleo.

Además, al consumir estos combustibles fósiles se emiten una gran cantidad de gases perjudiciales tanto para el medio ambiente como para las personas. Uno de estos gases es el dióxido de carbono (CO₂) que se emite en el momento de la combustión de estos combustibles fósiles. La emisión de este gas se ha duplicado desde principios de siglo XX hasta ahora, debido al gran consumo de esta fuente de energía (Quiroga Martínez, 2017). La emisión de este gas (CO₂) es el causante de uno de los mayores retos que tenemos hoy en día, el calentamiento global, aumento de la temperatura de la tierra, que tiene como consecuencia el cambio climático. Otro efecto de la quema de combustibles fósiles es la liberación de óxidos de azufre y nitrógeno que al reaccionar con la atmosfera provocan la acidificación del agua. Esto es lo que se conoce como lluvia ácida la cual contamina la tierra y el agua, tiene unas graves consecuencias en la vegetación, corroe edificios, estructuras metálicas y coches.

Actualmente, el panorama del sector energético se presenta de la siguiente manera:

- La mayor parte de la estructura energética proviene del consumo de combustibles fósiles, como se puede apreciar a continuación (Gráfico 3). La previsión es que siga aumentando, si no se toman medidas al respecto.

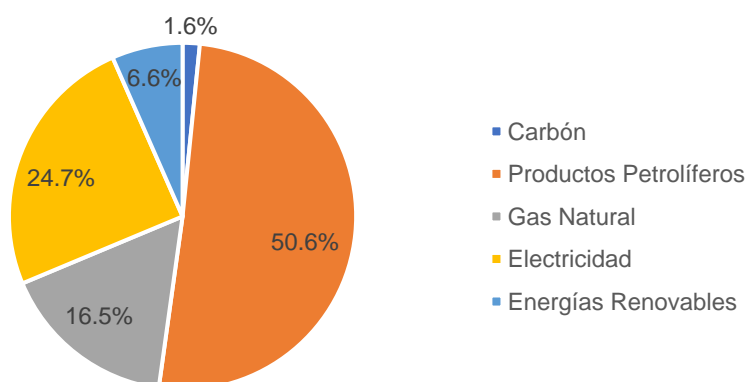


Gráfico 3 – Consumo de energía final en España por fuente en 2016

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recogidos en informe en *La Energía en España 2016*

- La población mundial sigue creciendo y con ello la dependencia energética de la actividad económica, la cual no se puede frenar. Todo esto sucede al mismo tiempo que nuestro principal combustible disminuye año tras año a pasos agigantados.
- Gran preocupación mundial sobre los efectos del consumo de energía en el mundo, cambio climático.
- Aumento de la demanda de energía en economías emergentes.

Esta situación ha provocado que la mayor parte de los organismos internacionales se centren en la innovación, desarrollo e implantación de nuevas fuentes de energía menos dependientes de los combustibles fósiles, menos contaminantes y más respetuosas con el medio ambiente. Por ello, se prevé que el futuro energético recaerá en la electricidad, a través de energías renovables, y el hidrógeno.

La energía eléctrica procedente de energías renovables (viento, agua, etc.) ha aumentado considerablemente en los últimos años, (como viene reflejado en la tabla mostrada anteriormente) puesto que presenta unos amplios beneficios para el medio ambiente y para generaciones futuras. En el año 2016, el 6,3% de la energía final consumida a nivel nacional es procedente de renovables. Entre sus ventajas destacamos la eliminación de emisiones de gases de óxidos de nitrógeno y azufre, especialmente en ambientes urbanos, lo que reduce el número de enfermedades que se producían por inhalar este tipo de gas produciendo enfermedades cardiorrespiratorias. La utilización de la electricidad supone menores emisiones de CO₂ al medio ambiente y un menor consumo energético. El proceso de conversión de la energía en electricidad que se lleva a cabo en una instalación grande mejora la eficiencia del proceso y utiliza menos energía que si se produce en pequeños motores de combustión, los cuales presentan un rendimiento menor.

Por otro lado, la combinación hidrógeno y pilas de combustible encajan en este panorama resolviendo gran parte de la situación actual, y en particular la gran dependencia de combustibles fósiles para el sector del transporte. Como hemos podido apreciar el 50,6% de la energía final consumida en España

procede de productos petrolíferos y el sector del transporte representa el 41,7% de la energía final consumida en España.

El hidrógeno se presenta como una fuente limpia de almacenamiento y transporte de energía que, como veremos más adelante, presenta la cualidad de ser combustible. Por otro lado, las pilas de combustible actúan como motor generando electricidad y calor cuando a estas se le suministra hidrógeno, como combustible.

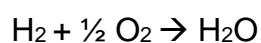
De esta manera este binomio, hidrógeno – pilas de combustible, reducen la dependencia energética respecto de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂, lo que supone un gran avance en la transición energética hacia un futuro sostenible.

4. ¿POR QUÉ EL HIDRÓGENO?

Se presenta al hidrógeno como el elemento para poner fin a la dependencia de los combustibles fósiles reduciendo las emisiones de gases contaminantes y mitigando el problema del calentamiento global en distintos ámbitos de nuestras vidas, y especialmente en el transporte.

Hay que dejar claro que el hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético de almacenamiento y transporte de energía. Por lo que no se encuentra en estado puro en la naturaleza (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido que presenta la cualidad de ser combustible; se oxida en presencia de oxígeno emitiendo energía en forma de calor. Al igual que ocurre con la gasolina o el gas natural. Una de las características diferenciadores del hidrógeno con respecto a otros combustibles, y el cual le hace tan atractivo, es que el residuo que emite es vapor de agua (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).



Respecto a los beneficios del hidrógeno dista destacar los siguientes:

- Beneficios medioambientales: puesto que el residuo que emite es vapor de agua, elemento que no es perjudicial para el medio ambiente.
- Beneficios de eficiencia energética y ahorro: el uso del hidrógeno conlleva la utilización de tecnologías más eficientes. Tienen un rendimiento mayor lo que les permite ahorrar en energía.
- Beneficios en materia de diversidad de suministro e independencia energética: como veremos a continuación el hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino que se obtiene empleando recursos primarios. Debido a que cada país tiene unos recursos naturales específicos, beneficia a cada uno de ellos en el sentido de que cada país puede producir su propio combustible; creando una independencia energética. Esto se traduce en una mejora de las condiciones de cada país en el sentido que promueve las economías locales creando puestos de trabajo, mejora la balanza de pagos y supone una seguridad en el suministro.

Los beneficios del hidrógeno son innegables de acuerdo con la abundancia de este elemento y su gran poder energético. De acuerdo con esto, en las próximas páginas explicaremos este elemento como fuente de almacenamiento de energía limpia y como posible sustituto de las energías tradicionales contaminantes.

3.1 ¿Dónde está?

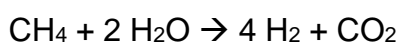
El hidrógeno es el elemento más simple y abundante del universo, alrededor del 75% del universo está compuesto de hidrógeno que podríamos utilizar si estuviera a nuestro alcance (en Júpiter se encuentra la acumulación de hidrógeno más cercana y aun estamos intentando viajar a Marte). En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso.

A pesar de la abundancia de este elemento, como hemos mencionado, éste no se encuentra en estado libre en la naturaleza. Para utilizar este combustible hay que extraerlo de la materia prima al que este se encuentre asociado necesitando para ello un aporte de energía. Se puede producir hidrógeno a partir de las siguientes materias primas: el agua, la biomasa o los recursos fósiles.

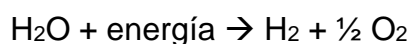
3.2 ¿Cómo se obtiene?

Para producir el hidrógeno, a partir de las materias primas mencionadas en el punto anterior, se utilizarán diferentes procedimientos requiriendo en ellos de un aporte de energía para su extracción.

Por un lado, el proceso de gasificación tiene lugar mediante la reformación del gas natural (metano). Este proceso consiste en dividir la molécula de este gas y combinarla con vapor de agua mediante un aporte energético. Este proceso al utilizar un recurso de origen fósil, además de obtener hidrógeno, se producen emisiones de CO₂. La producción de hidrógeno a través de este método es contaminante; cada kg de hidrógeno que se obtiene se emiten siete kg de CO₂. Sin embargo, este proceso tiene la ventaja de ser menos costoso económicamente. El 94% del hidrógeno producido a nivel mundial se obtiene mediante este proceso (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).



Por otro lado, los procesos que producen hidrógeno por medio de la separación de la molécula de agua requiriendo para ello un aporte de energía. El proceso más conocido dentro de este grupo es la electrólisis. El gran inconveniente de este proceso es que requiere de un aporte de energía considerable, por lo que supone un mayor coste económico (Asensio, 2007). También existen otros como la termólisis, la fotoelectrólisis, etc. La gran ventaja que engloba a este grupo es que no emiten CO₂, por lo que son considerados completamente limpios (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).



Como hemos visto, los procesos de obtención de hidrógeno requieren de una materia prima de la cual extraerse y de un aporte energético para llevar a cabo esa extracción. Por ende, la sostenibilidad del proceso dependerá de las tecnologías y la aportación de energía empleada para su producción, como se puede apreciar en la siguiente figura.

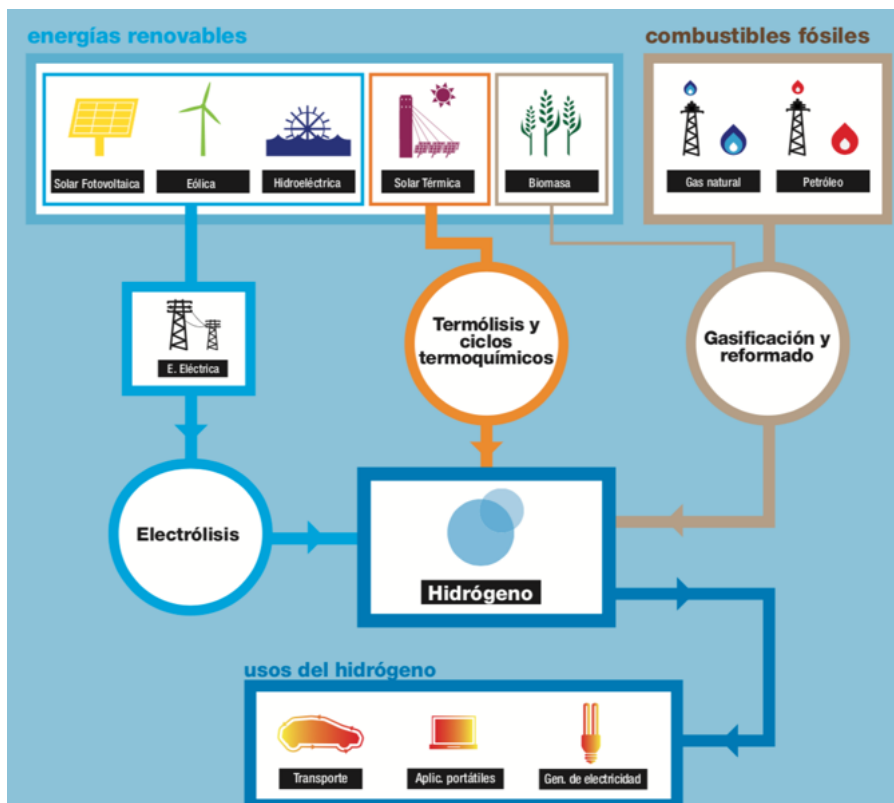


Figura 1 – Cadena de producción del hidrógeno

Fuente: Informe del Estado de las Tecnologías del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible en Andalucía

Ahora bien, el hidrógeno tiene la capacidad de almacenar y transportar energía, pero a partir únicamente del hidrógeno esta no puede ser consumida. Para ello es necesario transformar esa energía almacenada en el hidrógeno en electricidad, o calor, a través de pilas de combustible o motores de combustión interna.

3.3 Antecedentes del hidrógeno

Aunque el hidrógeno es un tema de actualidad con perspectivas a futuro, sus orígenes se remontan a mediados del siglo XVIII cuando se descubrió este elemento.

A principios del siglo XIX los franceses construyeron el primer generador de hidrógeno para utilizarlo en globos de reconocimiento. Mas adelante este compuesto pasó a ser utilizado en la aviación alemana como combustible secundario del zepelín que cruzaban el Atlántico. Esto supuso un gran cambio puesto que anteriormente únicamente se usaba este gas para mantener la fuerza de ascensión de globos y dirigibles (Asensio, 2007).

El desastre del dirigible Hindenburg en 1937, cuando se incendió antes de aterrizar en Nueva Jersey (Estados Unidos) en medio de una tormenta eléctrica, supuso el fin del uso del hidrógeno ya que se culpó a este gas de la tragedia ocurrida (Asensio, 2007).

A lo largo del siglo XIX se experimentó con el uso del hidrógeno en diferentes ámbitos como en motores de explosión tanto de coches, camiones, locomotoras e incluso submarinos. En 1973 con la crisis del petróleo se percibió el hidrógeno como una alternativa, como un “sustituto del petróleo”. Sin embargo, la crisis pasó.

Países como Estados Unidos, Japón, Alemania o Canadá continuaron dedicando millones a la investigación del potencial del hidrógeno, especialmente en el sector aeronáutico y automoción. En 1992, el mundo empezó a preocuparse por los efectos que provocaba el consumo de petróleo y, fundamentalmente, el cambio climático. Gracias a estos países hoy no partimos de cero, sino que llevamos años experimentando con nuevas formas de energía y entre ellas el hidrógeno (Asensio, 2007).

5. PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible se asemejan a baterías de alta tecnología cuya función es convertir la energía química presente en un combustible en energía eléctrica. (Asensio, 2007)

Hay una gran diferencia entre las baterías convencionales y las pilas de combustible. Una batería almacena en su interior energía química que luego convierte en electricidad. Cuando esa energía que almacena se termina, o bien se tira la batería o se recarga (en el mejor de los casos). Sin embargo, la pila de combustible genera energía eléctrica de forma continua siempre y cuando esté recibiendo aporte de energía química de un combustible. (Asensio, 2007)

La pila de combustible, para producir electricidad, necesita oxígeno; que es uno de los reactivos de la pila que, debido a su disponibilidad en el aire, no hace falta almacenar. Otro de los reactivos que necesita la pila para generar electricidad es un combustible, el hidrógeno. Este es el elemento que alimenta dicha pila (Asensio, 2007).

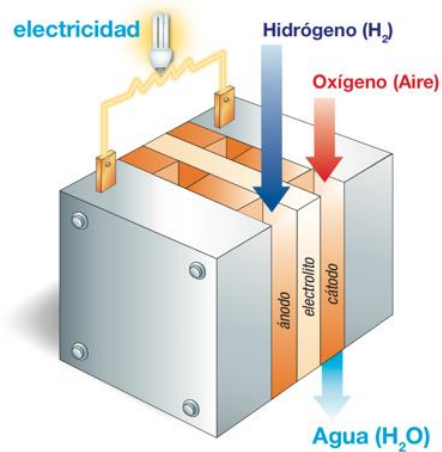
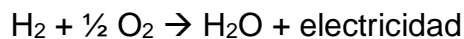


Figura 2 – Funcionamiento de una pila de combustible

Fuente: Informe del Estado de las Tecnologías del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible en Andalucía

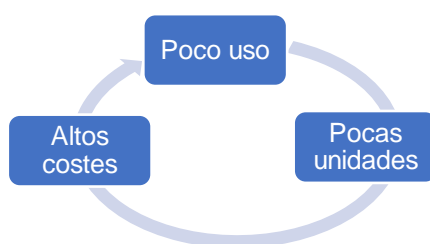
El funcionamiento de las pilas de combustible se sustenta en el principio contrario de la electrólisis. La combinación de hidrógeno y oxígeno genera electricidad y emite, como residuo, agua (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).



6. USOS DEL BINOMIO HIDRÓGENO – PILA DE COMBUSTIBLE

Las características de los sistemas que emplean pilas de combustible presentan importantes ventajas como: variedad, alta eficiencia, bajo nivel de ruido, bajas o nulas emisiones de gases contaminantes, etc. Estas, las hacen interesantes para diversas aplicaciones, en las cuales se requiera una elevada cantidad de energía almacenada y que sea fácilmente gestionada y transformable en electricidad y/o calor (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

Esto provoca que la tecnología del hidrógeno y pilas de combustible sea de interés para un gran número de sectores. No obstante, el alto coste de estos sistemas plantea una barrera de entrada en múltiples sectores difícil de superar. El problema es: no se emplean estas tecnologías por tener altos costes; el poco uso provoca que se fabriquen pocas unidades lo que provoca un coste mayor (puesto que no te permite alcanzar economías de escala).



Existen nichos de mercado en los que el hidrógeno y las pilas de combustible se están empleando durante unos años. Estos son: sector defensa, telecomunicaciones y la industria aeroespacial. Estos sectores son menos sensibles al precio, por lo que han implementado estas tecnologías con anterioridad.

Algunos ejemplos son: los submarinos convencionales que utilizan pilas de combustible para la generación de energía eléctrica; su uso en vehículos espaciales para la producción de electricidad y agua; pilas de combustible para alimentar boyas que se encuentran en los océanos, etc.

Por otro lado, el hidrógeno viene siendo utilizado en el sector industrial desde hace mucho tiempo. El reciente descubrimiento y efectividad del hidrógeno como combustible le ha abierto las puertas para diferentes áreas de aplicación. Esto viene determinado en gran parte por la utilización de las pilas de combustible, las cuales funcionan a través de este gas generando electricidad y calor.

A la utilización del hidrógeno en el ámbito industrial se le suman otras tres importantes aplicaciones: utilización del hidrógeno como combustible en el transporte, generación de energía a través de las pilas de combustible, y utilización del hidrógeno como sistema de almacenamiento energético (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

5.1 Hidrógeno en la industria

Diferentes industrias como la alimentaria, química o la petroquímica han mostrado un creciente interés en el desarrollo de las tecnologías relacionadas con el hidrógeno puesto que les permiten cubrir nuevas necesidades y alternativas para competir en costes. Además, cumplir con los nuevos requisitos legislativos para reducir el impacto medioambiental en sus actividades (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

Uno de los usos del hidrógeno a nivel industrial es para el proceso de producción de la gasolina puesto que se utiliza como elemento de refino del petróleo. A la gasolina producida, se le añade posteriormente un porcentaje de bioetanol con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂. La Unión Europea está evaluando la opción de utilizar hidrógeno renovable (producido mediante electrólisis) permutando así la cuota de bioetanol. Esto tiene como consecuencia una mayor producción de este gas, de forma “verde”, en vez de a través de gas natural (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

5.2 Combustible para el transporte

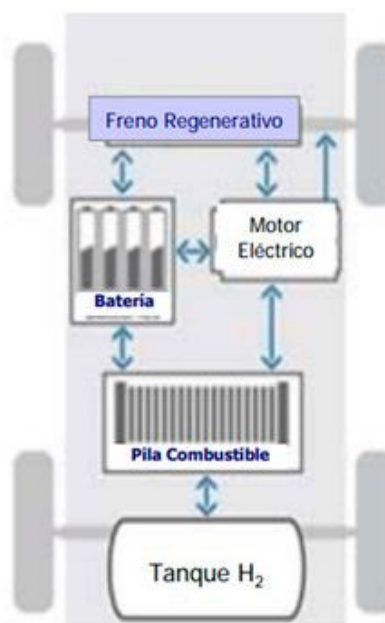
Se han llevado a cabo diferentes proyectos y demostraciones en el sector del transporte utilizando hidrógeno como fuente de combustible. Esto engloba aplicaciones en el sector ferroviario, naval, aeronáutico y de carretera.

Los vehículos que emplean hidrógeno como combustible son vehículos eléctricos provistos de una pila de combustible la cual transforma hidrógeno en energía eléctrica. Esta energía es la que se utiliza en un motor. La diferencia con los vehículos eléctricos es que estos no almacenan energía, sino hidrógeno. De esta forma estos vehículos gozan de las ventajas de los eléctricos, como nulas emisiones de CO₂, y además tienen una elevada autonomía y el tiempo de repostaje es menor.

Figura 3 – Funcionamiento del vehículo de pila de combustible (FCEV, por sus siglas en inglés; "Fuel Cell Electric Vehicle")

Fuente: Sitio web Motorpasión

El hidrógeno almacenado interactúa con la pila de combustible. En la pila reacciona el oxígeno con hidrógeno generando electricidad y agua. Esa electricidad alimenta tanto la batería como el motor. Por último, se emite vapor de agua como residuo.



Especialmente se ha promovido el uso del hidrógeno como combustible en zonas sensibles, medioambientalmente hablando, ya sea por ruido o por contaminación; en zonas protegidas (entornos naturales) o zonas muy turísticas. Esto se ve reflejado en tranvías o pequeñas embarcaciones que son propulsadas mediante dicho gas.

En lo que se refiere al sector naval, se ha utilizado este combustible como medio de propulsión para pequeñas embarcaciones, embarcaciones grandes y hasta submarinos.

Por último, en el sector aeronáutico se han desarrollado algunas versiones de sistemas de potencia auxiliar para aviones. Además, se están realizando estudios para barajar la posibilidad de que las aeronaves utilicen hidrógeno como combustible.

5.3 Generación de energía distribuida

A través del hidrógeno como suministros de las pilas de combustible se puede generar energía en forma de electricidad o calor. En este marco de generación de energía distribuida también tienen cabida métodos mas convencionales como es el caso de los motores de combustión interna y turbinas, los cuales se están optimizando para su uso con hidrógeno (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

Esta energía que se genera tiene aplicaciones en ámbitos diversos como en una vivienda familiar (como es el caso de ENE – FARM que veremos mas adelante), en centros de almacenamiento de datos con necesidad de energía o en una industria que cuenta con una corriente de biogás la cual se puede aprovechar para realizar cogeneración, es decir, generación de electricidad y calor de forma simultanea.

El hidrógeno en el modelo actual de red eléctrica, el cual funciona con pocos y grandes generadores, está mostrando grandes debilidades. Sin embargo, en los modelos de generación distribuida, en los cuales la electricidad se produce en generadores de menor tamaño, presenta grandes ventajas. Destacamos la eficiencia de la pila de combustible para la generación de energía eléctrica, así como de la cogeneración. Otras de las cualidades que presenta esta tecnología es su fiabilidad en el uso y su gran variedad lo que le permite adaptarse fácilmente a las necesidades e la demanda.

5.4 Almacenamiento energético

Actualmente nos encontramos numerosas situaciones en las cuales es la oferta de energía eléctrica supera a su demanda. Esta situación se conoce como “desacoplamiento entre la oferta y la demanda”, lo que supone que parte de la energía eléctrica se debe almacenar para ser empleada en los momentos opuestos, cuando la demanda sea mayor a la oferta.

Para que el hidrógeno sirva como fuente de almacenamiento de energía es necesario los siguientes componentes tal y como vemos en la Figura 4:

- Un sistema de entrada de energía eléctrica (Ejemplo: energía eólica).
- Un electrolizador: dispositivo el cual en el paso de corriente eléctrica disocia el agua (H_2O) en sus dos componentes (hidrógeno y oxígeno).
- Un compresor para comprimir el hidrógeno obtenido y hacer mas fácil su almacenamiento.
- Un sistema de almacenamiento de hidrógeno.
- Una pila de combustible (motor de hidrógeno) que produce electricidad a partir del hidrógeno almacenado, emitiendo vapor de agua en el proceso.
- Un sistema de salida de energía eléctrica.

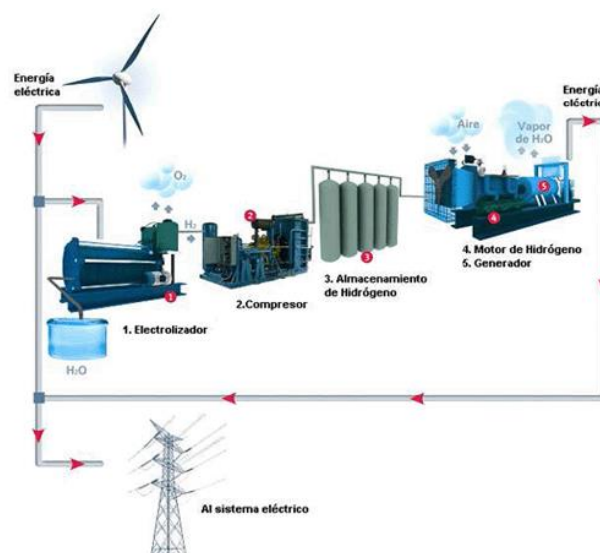


Figura 4 – Proceso de almacenamiento energético

Fuente: Sitio web Sotavento Galicia

El almacenamiento de energía a través del hidrógeno presenta ventajas e inconvenientes. Como principal ventaja, es una alternativa clara y flexible con una capacidad mucho mayor que los sistemas tradicionales. Además, se puede almacenar este compuesto durante un largo periodo de tiempo sin perder calidad o fugas. Sin embargo, el principal inconveniente de esta alternativa viene relacionado con los costes del sistema contemplado.

Este concepto de almacenamiento de energía eléctrica para usarlo cuando sea necesario (demanda mayor que la oferta) recibe el nombre de "Power to Power" (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

7. POSICIONAMIENTO DEL BINOMIO HIDRÓGENO – PILA DE COMBUSTIBLE

El posicionamiento a nivel mundial en cuanto al desarrollo e investigación del binomio hidrógeno – pilas de combustible viene determinado entorno a tres ejes: Japón, Estados Unidos (California) y el norte de Europa (Alemania, Escandinavia y Reino Unido). Estas regiones aglutinan el mayor número de empresas y proyectos destinados al desarrollo de estrategias para la introducción de estas tecnologías (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

6.1 Japón

Japón fue el primer país en desarrollar un plan nacional de hidrógeno y pilas de combustible. Este país se centra en la fabricación de pilas de combustible y en su aplicación en el ámbito doméstico e industrial, incluyendo la cogeneración de electricidad y calor. En 2009, Tokyo Gas lanzó el programa denominado ENE-FARM mediante el cual comenzó a comercializar un sistema doméstico de producción de energía y calor. Este sistema tiene el tamaño de un refrigerador lo que hace es transformar el gas que va a las viviendas en hidrógeno y utilizando una pila de combustible se genera electricidad. Además, este sistema se utiliza para calentar el agua que va a las viviendas. Ver siguiente figura. (TOKYO GAS, 2019)

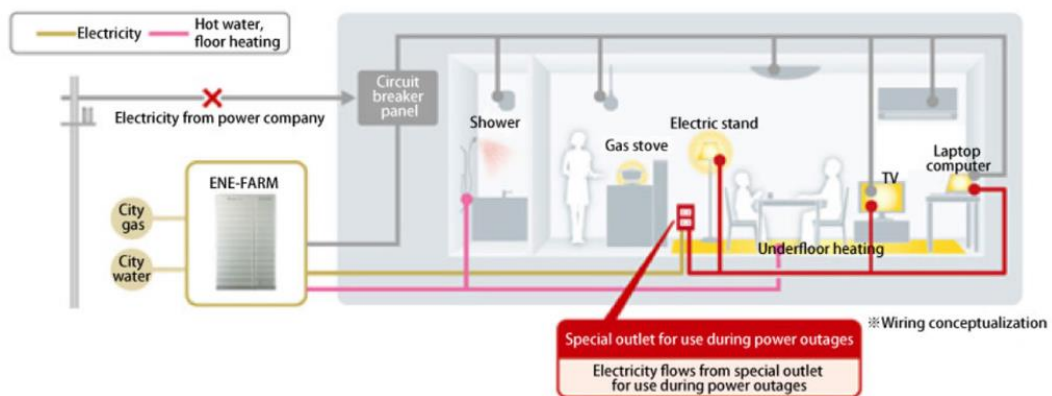


Figura 5 – Funcionamiento sistema ENE – FARM

Fuente: Sitio web Tokyo Gas

Este sistema, aun funcionando con combustibles fósiles (gas) presenta una serie de ventajas reales. En primer lugar, a través de este sistema la electricidad se genera en las viviendas, en el mismo sitio donde va a ser consumida, lo que conlleva a reducir pérdidas en la transmisión. La contrapartida sería transformar ese gas en energía en una central eléctrica y luego distribuirla a las viviendas, lo que produce pérdidas mayores. En segundo lugar, cuando el calor y la energía se suministra a través de este sistema, se puede ofrecer una eficiencia del 95%. Esto es significativo comparado con el 40% de eficiencia que presenta la red de entrega de calor y energía en Japón. (TOKYO GAS, 2019)

Desde su lanzamiento se han instalado mas de 120.000 unidades, que se pretende que sean millones para 2030. Este sistema al comienzo era muy caro, debido a los altos costes de producción, por lo que iba acompañado de una subvención por parte del estado de 15.000 \$ por unidad (Asociación española del Hidrógeno, 2015). La empresa ha conseguido reducir sus costes, pudiendo rebajar el precio del producto reduciendo también el subsidio y conseguir hacerlo más atractivo.

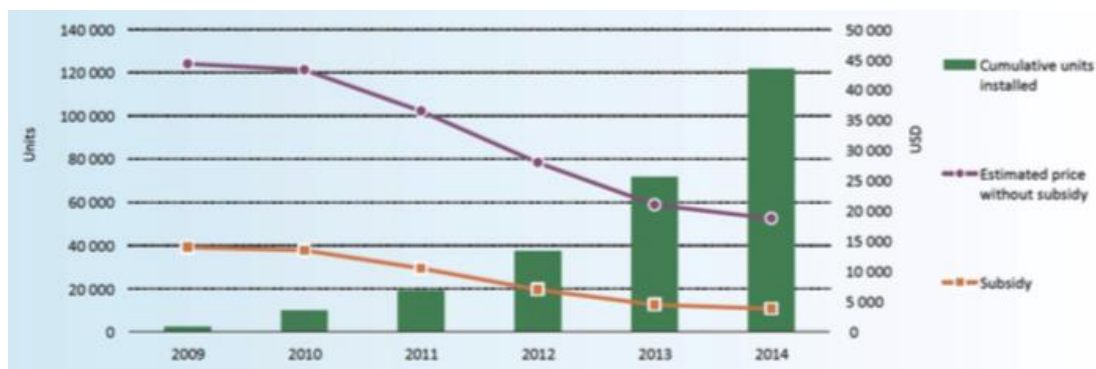


Gráfico 4 – Programa ENE-FARM: Unidades vendidas acumuladas, importe de la subvención y evolución en el precio

Fuente: Informe *Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells*. IEA. 2015

6.2 Europa

Tanto Europa como Estados Unidos se centran en la promoción del hidrógeno como combustible para transporte por carretera. Ambas regiones se encuentran desarrollando estrategias para la producción, distribución y el sistema de suministro necesario para hacer funcionar la infraestructura del hidrógeno en determinadas regiones (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

En Europa es de renombre el proyecto *H2 Mobility* orientado a la comercialización de los vehículos de hidrógeno, propulsados por una pila de combustible, y la infraestructura necesaria para poder operar con ellos en todo Europa. Esta iniciativa tiene como objetivo primordial la creación de una red de estaciones de servicio de hidrógeno que permita recorrer Europa con vehículos de pila de combustible (Asociación española del Hidrógeno, 2015). No se trata de un proyecto aislado sino de un proyecto conjunto de diferentes países miembros de la Unión Europea.

Este proyecto fue creado en Alemania en el año 2010, financiado originalmente por el gobierno alemán y actualmente cuenta con la financiación de la *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH JU). Se trata de una empresa público-privada que apoya las actividades de investigación, desarrollo tecnológico y demostración de tecnologías de pilas de combustible e hidrógeno en Europa.

Aunque este proyecto nació en Alemania otros países miembros de la Unión Europea han desarrollado sus propios “H2 Mobility”. Estos son el Reino Unido con *UKH2 Mobility*, Suiza con el *Swiss H2 Mobility*, Francia con el *H2 Mobilité France* y Noruega, Dinamarca y Suecia con el *The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership* (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

En 2014, a través de la aprobación de la Directiva europea relativa a la promoción del uso de alternativas para el transporte, siendo el hidrógeno uno de estos, obligó a los estados miembros a llevar a cabo estrategias para la inclusión de estos en un tiempo limitado (Asociación española del Hidrógeno, 2015). Esta Directiva se convierte en el año 2015 en un Real Decreto, el cual contiene los parámetros referidos al hidrógeno.

Además, se crea una estrategia interministerial liderada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo para el impulso del vehículo con energías alternativas (VEA) en España. A través de esta estrategia se pretende construir 21 estaciones de servicio de hidrógeno en España para el año 2020 y la venta y puesta en circulación de 2800 vehículos (propulsados con hidrógeno).



Figura 6 – Estrategia de impulso del vehículo con energías alternativas (VEA) en España (2014-2020)

Fuente: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo

En el año 2016, se pone en marcha el PLAN MOVEA, es decir, el Plan de Impulso a la Movilidad con Vehículos de Energías Alternativas. Esta medida forma parte de la estrategia de impulso del vehículo con energías alternativas (VEA) en España 2014-2020. A través de esta medida se pretende incentivar la demanda y compra de este tipo de vehículos reduciendo el sobrecoste hasta de un 30% que puede presentar este tipo de vehículos frente a su homólogo (PLAN MOVEA , 2016).

Por último, también existen diferentes organizaciones que se encuentran trabajando en la promoción, desarrollo e introducción del binomio hidrógeno – pila de combustible. Debemos destacar la Asociación Española del Hidrógeno (AeH2), la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE-HPC) y la Asociación Española de Pilas de Combustible (Appice). Además, el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de la iniciativa INGENIO 2010, ha creado varias Instalaciones Científicas y Tecnológicas Singulares (ICTS) que tienen como objetivo la investigación científica y tecnológica de todos los aspectos relacionados con este binomio (Agencia Andaluza de la Energía, 2010).

6.3 Estados Unidos

Estados Unidos ha adoptado una postura de liderazgo a nivel mundial mediante diferentes programas. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE) se encarga de la gestión del programa de Hidrógeno y pilas de combustible de este país (Agencia Andaluza de la Energía, 2010). Entre sus objetivos se encuentran:

- Educación y formación sobre la Economía del Hidrógeno
- Producción de hidrógeno a partir de recursos propios
- Almacenamiento de hidrógeno en vehículos
- Pilas de combustible
- Análisis de los costes del sistema, la eficiencia energética, los impactos sociales y el sistema de comercio

En Estados Unidos también destaca el programa *H2USA*, lanzado en 2013 por el DoE y que cuenta con más de 30 participantes. Se trata de una colaboración público-privada para promover introducción y adopción de vehículos de pila de combustible en todo Estados Unidos. A esto se suma el desarrollo de la infraestructura necesaria para la producción y suministro del hidrógeno en estaciones de servicio. Entre los objetivos del *H2USA* se encuentra promover la seguridad del suministro energético a nivel nacional, reducción de emisiones de gases perjudiciales y la demostración de nuevas tecnologías (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

En Estados Unidos también debemos mencionar el *California FuelCell Partnership* (CaFCP) lanzado en 1999 por la Comisión de Energía del estado de California y el *California Air Resources Board*. Esta iniciativa se centró en la promoción del vehículo de pila de combustible con el objetivo de aumentar la eficiencia energética y, de esta manera, eliminando la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

8. PERSPECTIVAS DE FUTURO EN EL TRANSPORTE

La mayoría de los proyectos e investigaciones llevadas a cabo por diferentes países impulsan o promueven el uso del binomio hidrógeno – pilas de combustible en el sector del transporte. Es decir, llevar a cabo estrategias para introducir el vehículo de pila de combustible (FCEV por sus siglas en inglés, *Fuel Cell Electric Vehicle*) en este sector.

Los países que están implementando esta nueva tecnología en este sector se están aprovechando de importantes ventajas como la capacidad de usar un combustible renovable producido localmente y que no emite gases contaminantes al ser utilizado (Asociación española del Hidrógeno, 2015).

En la actualidad se han comercializado más de 7.000 vehículos de pila de combustible en el mundo desde que salieron a la venta en el año 2013. Los principales países o regiones donde se han vendido estos vehículos son Estados Unidos (California específicamente) 53%, Japón 38% y la Unión Europea 9%.

California fue el primer país por apostar por los vehículos de pila de combustible. Hoy en día cuenta con 6.111 vehículos y con 30 autobuses de pila de combustible y hay 39 estaciones de hidrógeno. (California Fuel Cell Partnership, 2019).

En este apartado vamos a llevar a cabo un análisis del atractivo de este vehículo y su previsible evolución en base a los siguientes factores:

- Precio venta
- Estaciones de servicio de hidrógeno
- Autonomía y tiempo repostaje
- Coste combustible anual

7.1 Precio de venta

Los vehículos de pila de combustible al entrar en un nuevo mercado pueden llevar a cabo diferentes estrategias en cuanto al precio del producto. Entre ellas: establecer un precio similar a sus competidores, fijar un precio basado en el coste (en este caso no tienes en cuenta el mercado), averiguar cuanto están dispuestos los consumidores a pagar por tu producto para fijar el precio, etc.

	Hoy	2030	2050
Gasolina	25.454 €	27.501 €	28.747 €
Diésel	26.077 €	28.213 €	29.459 €
Híbridos (gasolina)	26.700 €	28.302 €	29.548 €
Híbrido eléctrico enchufable	28.836 €	29.548 €	30.616 €
Eléctricos	31.506 €	29.192 €	30.260 €
Pila de combustible (FCEV)	53.400 €	29.904 €	29.726 €

Tabla 2 – Comparación y prevista evolución del precio de los diferentes tipos de vehículos en euros.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recogidos en informe *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*. IEA. 2015
(Tipo de cambio utilizado 1€ = 0,89 \$)

En la Tabla 2 reflejamos la media de los precios que hay hoy en día en el sector del automóvil diferenciándolos por tipo y la evolución prevista en un futuro. De esta manera analizaremos la estrategia en precio que han llevado a cabo las empresas automovilísticas, respecto al vehículo de pila de combustible, y su grado de atractivo tanto hoy en día como en el futuro.

Como se puede apreciar en la tabla los vehículos de pila de combustible son los más caros hoy en día siendo el coste de estos el doble de estos. El precio se ve condicionado por los altos costes asociados a la producción de este vehículo en pequeñas cantidades. Las empresas automovilísticas han decidido llevar a cabo una estrategia en precio basado en su coste mas un margen suficiente para cubrir los gastos estructurales del proceso de fabricación y comercialización buscando una situación de equilibrio financiero (breakeven) no perdida, no beneficio.

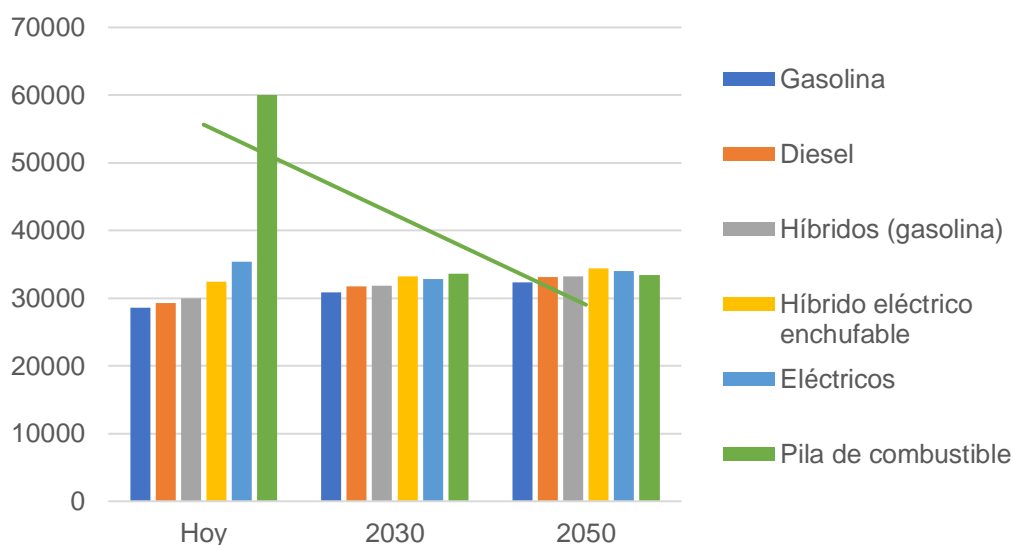


Gráfico 5 – Comparación y prevista evolución de precio para cada tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recogidos en informe *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells IEA. 2015*

Como se puede apreciar, se espera una caída del precio de los vehículos de pila de combustible en el futuro. En el año 2030 el precio de este tipo de vehículos consigue asemejarse al de sus competidores e incluso en el año 2050 se espera que tengan un precio menor que los vehículos eléctricos o los híbridos enchufables.

La disminución en el precio de estos vehículos está relacionada con el aumento de producción de este tipo de vehículos lo cual permite a las empresas automovilísticas fijar un precio menor. La creciente penetración de esta nueva tecnología en el mercado del automóvil y en el transporte en general permitirá alcanzar economías de escala que generará eficiencias en coste posicionando esta tecnología a precios competitivos frente a mercados maduros (gasolina, diésel) o incluso mercados emergentes (híbridos y eléctricos).

Por otro lado, podemos anticipar una subida del precio significativa tanto en los vehículos convencionales de gasolina como los de diésel. Esto se debe a que estos tipos de vehículos son altamente contaminantes por lo que los gobiernos están subiendo el impuesto relacionado a estos, provocando que aumenten de precio. Además, el hecho de que estos vehículos utilizan como combustible un recurso escaso procedente de recursos fósiles, también afecta en la prevista subida del precio de estos en el futuro.

7.2 Estaciones de servicio de hidrógeno

El principal reto para que el hidrógeno se convierta en el combustible del futuro, y por lo tanto el *FCEV* en el vehículo del futuro, es el de desarrollar la infraestructura necesaria. De nada sirve que las empresas automovilísticas inviertan millones si no hay estaciones de servicio operativas donde se pueda repostar. Es por ello por lo que los países y gobiernos deben apostar por esta nueva tecnología invirtiendo en la creación de estaciones de servicio. Según expertos, el coste de cada estación de servicio de hidrógeno ronda los 1,5 millones de euros. (Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA, s.f.)

En California actualmente hay 39 y se están desarrollando estrategias para abrir 25 nuevas estaciones de hidrógeno en el corto/medio plazo.

En Europa hay grandes perspectivas de crecimiento gracias al proyecto *H2 Mobility*. Actualmente en Europa hay 111 estaciones de servicio de hidrógeno y 51 se encuentran en proceso de apertura (H2 Mobility , 2019). En España, en particular, hay 6 estaciones de servicio de hidrógeno y se espera la apertura de otras 2.

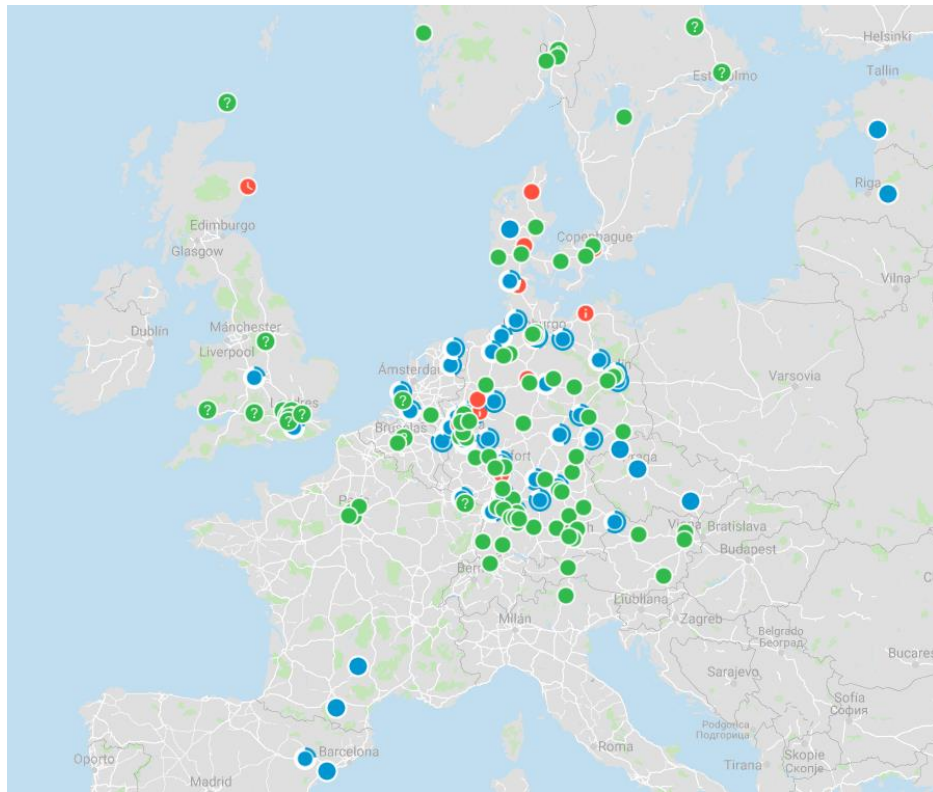


Figura 7 – Estaciones de servicio de hidrógeno en Europa

96 15 operando 51 en proceso

Fuente: Sitio web H2 Mobility

El número de estaciones de servicio de hidrógeno disponibles para repostar también tiene una relación directamente proporcional con el número de coches producidos y con la venta de estos. La escasez de estaciones de servicio actuales limita la venta de este tipo de vehículos puesto que no permite repostar a potenciales usuarios con facilidad. Es decir, a medida que se desarrolle la red de estaciones de servicio de hidrógeno provocará un aumento de la producción de estos y un incremento de su venta.

7.3 Comparativa de repostaje y autonomía

En este punto vamos a llevar a cabo una comparación entre un vehículo convencional (gasolina o diésel), uno eléctrico y uno de pila de combustible.

	Autonomía	Consumo	Capacidad depósito	Tiempo de repostaje (completo)
BMW 118 i	600 km	7 L /100 km	52 L	2-3 minutos
Tesla Model 3 Standard	450 km	20 kwh/100km	75 kwh	44 minutos (Supercargador)
				8-22 horas conexión standard
Toyota MIRAI	500 km	0,76 kg/100km	5 kg	3-5 minutos

Tabla 3 – Comparativa vehículo convencional (BMW 118i), eléctrico (Tesla Model 3 Standard) y de pila de combustible (Toyota MIRAI)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Tesla, BMW y H2Mobility

El gran atractivo de los vehículos de pila de combustible viene en relación con su autonomía y tiempo de repostaje. Las empresas automovilísticas actualmente han conseguido asemejar las prestaciones de los vehículos de pila de combustible a los vehículos convencionales en cuanto a autonomía y tiempo de repostaje. Sin embargo, es aquí donde los vehículos eléctricos tienen su gran inconveniente en relación con el tiempo de carga de sus baterías, lo que reduce su atractivo.

El vehículo de pila de combustible goza de las prestaciones de un convencional, en cuanto a autonomía y tiempo de repostaje, con la gran ventaja de un eléctrico, en cuanto a emisiones nulas de CO₂.

7.4 Coste de combustible en un año

A continuación, vamos a llevar a cabo un análisis del coste que le supondría a un cliente el combustible de todo un año con un vehículo convencional (BMW 118i), un vehículo eléctrico (Tesla Model 3) y un vehículo de pila de combustible (Toyota MIARI). Suponemos que todos estos vehículos recorren 10000 km en un año.

Para este análisis utilizamos la información de consumo expuesta en la tabla anterior a la cual añadimos los siguientes datos para el cálculo:

- Precio gasolina: 1,3 € / L
- Precio kilovatio hora: 0,13 € / kwh
- Precio hidrógeno: 9,5 € / kg

Para calcular el coste anual empleamos la siguiente expresión:

Coste anual = precio combustible * consumo * distancia recorrida

→ Coste anual en combustible vehículo convencional BMW 118i:

$$\text{Coste anual} = 1,3 \text{ € / L} * 7 \text{ L / 100 km} * 10000 \text{ km} = 910 \text{ €}$$

→ Coste anual en combustible vehículo eléctrico Tesla Model 3:

$$\text{Coste anual} = 0,13 \text{ € / kwh} * 20 \text{ kwh / 100 km} * 10000 \text{ km} = 260 \text{ €}$$

→ Coste anual en combustible vehículo de pila de combustible Toyota

MIARI:

$$\text{Coste anual} = 9,5 \text{ € / kg} * 0,76 \text{ kg / 100 km} * 10000 \text{ km} = 723 \text{ €}$$

A raíz de este análisis sacamos en conclusión que el vehículo eléctrico es el más barato en cuanto al coste de combustible en un año, siendo este la tercera parte de uno convencional. Por otro lado, debemos destacar que el vehículo de pila de combustible es más barato en cuanto a combustible hoy en día que un convencional.

9. CONCLUSIÓN

Como hemos podido analizar a lo largo del trabajo el hidrógeno tiene grandes perspectivas de futuro como sustituto a los combustibles convencionales. El uso del hidrógeno en el sector del transporte reduce la dependencia de esta fuente de energía primaria caracterizada por ser escasa y altamente contaminante.

Mediante el uso del binomio analizado (hidrógeno – pila de combustible) los vehículos que funcionan con esta tecnología los podemos considerar como el futuro de la movilidad en términos sostenibles.

¿Existe hoy en día una infraestructura real que facilite el crecimiento del vehículo de pila de combustible? Ciertamente no. Actualmente son los vehículos híbridos los que están teniendo una mayor aceptación entre los usuarios ya que reducen (sin llegar a eliminar) emisiones de CO₂, gozan de una mayor autonomía que los eléctricos y presentan mayores facilidades en cuanto a repostaje.

Una vez demostrado que la tecnología del hidrógeno funciona en el sector del transporte, como ocurre en California, y que empresas como Toyota, Hyundai y Honda ya comercializan vehículos de pila de combustible; es necesario que los estados impulsen y faciliten el desarrollo de puntos de repostaje. Alemania se encuentra en la cabeza en el desarrollo de estaciones de servicio de hidrógeno con 64 abiertas y 34 en proceso de apertura (H2 Mobility , 2019).

Un punto importante es que esta nueva tecnología debe ser compatible con la red de gasolineras existentes como un punto más de carga sin necesidad de crear estaciones de servicio desde cero, reduciendo de esta manera la inversión en infraestructura.

Las grandes ventajas de los vehículos de pila de combustible frente a los vehículos eléctricos y los convencionales (incluidos híbridos) son: respecto a los primeros, el menor tiempo de repostaje y/o carga; frente a los segundos, el uso de un combustible que no es ni limitado ni contaminante.

En el corto/medio plazo, el gran reto reside en crear una amplia red de estaciones de servicio de hidrógeno que estimule a los usuarios a apostar por los vehículos de pila de combustible. Una mayor demanda de estos vehículos provocará en el largo plazo una disminución de su precio igualándolo al precio de competidores haciendo más atractiva su adquisición.

10. BIBLIOGRAFÍA

- California Fuel Cell Partnership, 2019. *California Fuel Cell Partnership*. [En línea]
Available at: https://cafcp.org/by_the_numbers
- Agencia Andaluza de la Energía, 2010. *Estado de las tecnologías del hidrógeno y de las pilas de combustible en Andalucía*, Sevilla: s.n.
- Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA, s.f. *Planificación del despliegue de las estaciones de servicio de hidrógeno necesarias para facilitar el uso de este gas como combustible en Andalucía*, 2015: s.n.
- Asensio, P., 2007. *Hidrógeno y pila de combustible*, Madrid: s.n.
- Asociación española del Hidrógeno, 2015. *Estrategia de desarrollo del hidrógeno en Andalucía en el ámbito de la Risc3*, s.l.: Asociación Española del Hidrógeno.
- BMW, 2019. *BMW España*. [En línea]
Available at: <https://www.bmw.es/es/home.html>
- García Delgado, J. L., 2017. *Lecciones de Economía Española*. s.l.:Cívitas, 13ª Edición.
- H2 Mobility , 2019. *H2 Mobility*. [En línea]
Available at: <https://h2.live/en>
- International Energy Agency, 2015. *Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells*, Paris: s.n.
- Mártil, I., 2016. ¿Para cuando el final de los combustibles fósiles?. *Público*.
- Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, 2018. *La Energía en España 2016*, Madrid: s.n.
- Otero, A., 2018. *Motorpasión*. [En línea]
Available at: <https://www.motorpasion.com/tecnologia/coches-de-hidrogeno-asi-funciona-esta-tecnologia-de-cero-emisiones#comments>
- PLAN MOVEA , 2016. *Ministerio de Industria, Comercio y Turismo*. [En línea]
Available at: https://industria.gob.es/es-es/participacion_publica/Documents/consulta-publica-previa-MOVEA-2019.pdf

- Quiroga Martínez, B., 2017. *twenergy*. [En línea]
Available at: <https://twenergy.com/a/la-electricidad-frente-al-combustible-2734>
- Sotavento Galicia, s.f. *Sotavento Galicia*. [En línea]
Available at: <http://www.sotaventogalicia.com/es/proyectos/sistema-de-produccion-de-hidrogeno-con-eolica>
- TESLA, 2019. *TESLA España*. [En línea]
Available at: https://www.tesla.com/es_ES/model3
- TOKYO GAS, 2019. *TOKYO GAS*. [En línea]
Available at: https://www.tokyo-gas.co.jp/techno/english/menu3/2_index_detail.html
- Tverberg, G., 2012. *Our Finite World*. [En línea]
Available at: <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CONSUMO DE ENERGÍA FINAL POR SECTORES EN ESPAÑA, 2015	5
GRÁFICO 2 – ENERGÍA CONSUMIDA EN EL MUNDO POR FUENTE DE ENERGÍA ENTRE 1820 – 2010	6
GRÁFICO 3 – CONSUMO DE ENERGÍA FINAL EN ESPAÑA POR FUENTE EN 2016.....	8
GRÁFICO 4 – PROGRAMA ENE-FARM: UNIDADES VENDIDAS ACUMULADAS, IMPORTE DE LA SUBVENCIÓN Y EVOLUCIÓN EN EL PRECIO	23
GRÁFICO 5 – COMPARACIÓN Y PREVISTA EVOLUCIÓN DE PRECIO PARA CADA TIPO DE VEHÍCULO	28

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 – ENERGÍA CONSUMIDA EN EL PLANETA (TWH) EN LAS DÉCADAS DE 1980 A 2010.....	7
TABLA 2 – COMPARACIÓN Y PREVISTA EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS EN EUROS.	27
TABLA 3 – COMPARATIVA VEHÍCULO CONVENCIONAL (BMW 118i), ELÉCTRICO (TESLA MODEL 3 STANDARD) Y DE PILA DE COMBUSTIBLE (TOYOTA MIRAI)	31

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – CADENA DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO.....	13
FIGURA 2 – FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.....	15
FIGURA 3 – FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCEV, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS; “FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE).....	18
FIGURA 4 – PROCESO DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO	20
FIGURA 5 – FUNCIONAMIENTO SISTEMA ENE – FARM	22
FIGURA 6 – ESTRATEGIA DE IMPULSO DEL VEHÍCULO CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS (VEA) EN ESPAÑA (2014-2020)	24
FIGURA 7 – ESTACIONES DE SERVICIO DE HIDRÓGENO EN EUROPA	30