

1 Introducción

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es el diseño y desarrollo de un sistema de comunicaciones y de control entre los dispositivos de potencia de un vehículo eléctrico híbrido dotado de dos pilas de hidrógeno, centralizado en una Unidad de Control Electrónico o ECU. Abarca el desarrollo del software para manejar el estado general del vehículo, la supervisión y la respuesta ante errores, el control de las pilas de hidrógeno y la gestión de la potencia. Las pilas de hidrógeno son el elemento más destacable en el conjunto, al tratarse de dispositivos de acumulación de energía con una penetración relativamente reciente en la industria automovilística. Sus características, como el no emitir contaminantes en su funcionamiento, las han convertido en uno de los focos en la investigación de sistemas de propulsión alternativos. El resultado final es un sistema centralizado de control del vehículo sobre protocolo de comunicaciones bus CAN (Controller Area Network) e implementado en un computador de tipo PC/104. En el presente capítulo se hará una presentación de los conceptos tratados en el proyecto y del estado del arte de las pilas de combustible aplicadas a los vehículos eléctricos. En los capítulos posteriores se detallarán el desarrollo del trabajo realizado y sus conclusiones.

1.2 El hidrógeno

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. En condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico (H_2) incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794 u, el hidrógeno es el elemento químico más ligero y es, también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo. Se encuentra en abundancia en las estrellas y en los planetas gigantes gaseosos. En combinación con otros elementos se encuentra ampliamente distribuido en la Tierra, en donde el compuesto más abundante e importante del hidrógeno es el agua, H_2O . El hidrógeno se halla en todos los componentes de la materia viva y de muchos minerales. También es parte esencial de todos los hidrocarburos y de una gran variedad de otras sustancias orgánicas. Todos los ácidos contienen hidrógeno; una de las características que define a los ácidos es su disociación en una disolución, produciendo iones hidrógeno. Sin embargo, en la atmósfera terrestre se encuentra en tan sólo una fracción de 1 ppm en volumen.



Figura 1.1 El vehículo eléctrico híbrido DELFÍN 2.

La palabra hidrógeno puede referirse tanto al elemento atómico, como a la molécula diatómica (H_2) que se encuentra en trazas en la atmósfera terrestre. Los químicos tienden a referirse a esta molécula como dihidrógeno, molécula de hidrógeno, o hidrógeno diatómico, para distinguirla del elemento. Sus puntos de ebullición y fusión son los más bajos de todas las sustancias, a excepción del helio. Su punto de fusión es de $-259,2\text{ }^\circ\text{C}$ y su punto de ebullición de $-252,77\text{ }^\circ\text{C}$. A $0\text{ }^\circ\text{C}$ y bajo 1 atmósfera de presión tiene una densidad de $0,089\text{ g/l}$. Su masa atómica es 1,007. El hidrógeno líquido, obtenido por primera vez por el químico británico James Dewar en 1898, es incoloro (excepto en capas gruesas, que tienen un aspecto azul pálido) y tiene una densidad relativa de 0,070. Si se deja evaporar rápidamente bajo poca presión se congela transformándose en un sólido incoloro.

1.2.1 Propiedades del hidrógeno gaseoso

Las propiedades físicas y químicas de los combustibles gaseosos como el metano, propano e hidrógeno son bastante diferentes de las de los combustibles líquidos más comúnmente usados como la gasolina. El hidrógeno no es ni más ni menos peligroso en sí que la gasolina, el propano o el metano. La contribución potencial de una propiedad en particular del hidrógeno a un peligro determinado depende fuertemente de las condiciones específicas bajo las cuales el hidrógeno es liberado y/o confinado. Las propiedades más importantes del hidrógeno relativas a la seguridad se resumen en los siguientes puntos:

- Densidad: es el más ligero de los elementos.
- Densidad respecto al aire: el hidrógeno gaseoso a temperatura ambiente tiene mucha menos densidad que el aire.

- **Difusión:** aunque el transporte de gas por difusión es mucho menor que el debido a la diferencia de densidad con el aire, el hidrógeno se difunde en el aire mucho más deprisa que otros gases combustibles.
- **Color, olor, gusto y toxicidad:** el hidrógeno como el metano y propano es incoloro, inodoro e insípido y no tóxico.
- **Inflamabilidad y características de la llama:** el hidrógeno es inflamable en el aire en un amplio rango de concentraciones y arde, en ausencia de impurezas, con una llama casi invisible.
- **Energía de ignición:** el hidrógeno puede entrar en ignición con una cantidad de energía muy pequeña.
- **Límites de detonación:** el hidrógeno puede detonar en un rango de concentración bastante amplio cuando está confinado pero es muy difícil que detone en espacios abiertos.
- **Velocidad de la llama:** el hidrógeno, para concentraciones medias, tiene una velocidad de llama mayor que otros combustibles.
- **Temperatura de ignición:** el hidrógeno tiene mayor temperatura de ignición que los combustibles comunes.

Algunas de las propiedades anteriores son menos críticas que otras desde el punto de vista de la seguridad. Tan sólo un pequeño número de ellas se pueden considerar decisivas a la hora de evaluar los peligros potenciales y establecer sus factores de riesgo. Las condiciones normales de temperatura y presión (NTP) corresponden a propiedades a 0 °C y 1 atmósfera.

1.2.2 Propiedades del hidrógeno líquido

El hidrógeno líquido es el segundo líquido criogénico de menor temperatura después del helio. La relación densidad del hidrógeno líquido frente a la densidad del hidrógeno a temperatura ambiente es muy alta (845). El calor de vaporización y la viscosidad son muy pequeños en comparación con el de otros combustibles criogénicos. El coeficiente de difusividad del vapor es muy alto. La velocidad de vaporización para vertidos líquidos en el caso estacionario es extremadamente rápida. La velocidad de combustión de los líquidos vertidos es muy rápida. La energía de explosión del hidrógeno líquido en unidades de TNT es menor que para otros combustibles. La presión necesaria para mantener líquido el hidrógeno a temperatura ambiente es muy grande.

1.2.3 Producción de Hidrógeno

En todos estos campos hay gran cantidad de proyectos de investigación, en busca de procesos limpios y eficientes:

- **Reformado de combustibles.** Extrae, mediante reacciones químicas, el hidrógeno contenido en combustibles fósiles. Entre los combustibles factibles de reformado están el carbón, la gasolina, el metanol, las naftas, el diesel, el gas natural o el etanol. Es la técnica más económica para obtener hidrógeno, pero también genera gran cantidad de sustancias de desecho.

- **Electrólisis.** Es un método de separación de los elementos que forman un compuesto aplicando electricidad. Es un método limpio de transformación energética con una eficiencia cercana al 100%. Alimentado por fuentes renovables, puede considerarse la base de un sistema plenamente ecológico de producción y almacenamiento energético.
- **Producción biológica.** La producción de hidrógeno por biofotólisis, también citada como fotodisociación biológica del agua, se refiere a la conversión de agua y energía solar a hidrógeno y oxígeno usando microorganismos, comúnmente microalgas y/o cianobacterias.

1.2.4 Almacenamiento de hidrógeno

Existen distintos métodos para el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Las posibilidades dependen de la aplicación para la que se destina el hidrógeno y de la complejidad de ejecución. Los sistemas de almacenamiento y transporte de hidrógeno pueden ser clasificados en función de su estado gaseoso, líquido o sólido:

- **Gases comprimidos.** Puesto que los sistemas y métodos de producción generan hidrógeno gaseoso y que se emplea en su forma gaseosa, a priori es ventajoso almacenarlo y transportarlo en dicho estado. Por ello se hace uso de botellas a cierta presión. Sin embargo la comparación frente a otros combustibles indica que el almacenamiento del hidrógeno gaseoso en recipientes a presión no es competitivo. Esto es debido a la baja densidad del hidrógeno gaseoso y al alto coste de los recipientes a presión. El almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido es voluminoso y/o pesado y el coste por unidad de energía es alto. Para aplicaciones móviles se usan depósitos ultraligeros con nuevos materiales que cubren forman varias capas.
- **Líquidos criogénicos.** La criogenización está íntimamente relacionada con las propiedades y usos de los materiales a temperaturas extremadamente bajas en las etapas de producción, almacenamiento y operación de los fluidos criogénicos. A pesar de las dificultades, la tecnología para el manejo y almacenamiento de hidrógeno líquido se ha desarrollado de forma exitosa. Una vez que el hidrógeno ha sido licuado y purificado se necesita de un sistema que permita su trasiego y almacenaje. Los objetivos principales de estos sistemas están orientados a minimizar las pérdidas de fluido criogénico y a mantener las velocidades de transferencia dentro de unos parámetros de seguridad, fiabilidad y costes. El avance experimentado en el desarrollo de materiales y técnicas para el aislamiento ha sido formidable, y existen múltiples sistemas para el aislamiento, la mayoría de ellos empleados en el almacenamiento. El funcionamiento de estos depósitos de almacenamiento varía y depende principalmente del tipo de aislamiento empleado, del tamaño y forma del depósito y del soporte estructural del mismo.
- **Hidruros metálicos.** La tecnología de hidruros metálicos presenta ventajas frente a lo voluminoso de los sistemas de almacenamiento gaseoso y a lo poco práctico de los sistemas criogénicos. Presenta tres categorías en función del enlace químico utilizado: iónico, metálico y covalente. De tal manera se almacenan las moléculas de hidrógeno en el metal, siguiendo un proceso dificultoso de carga y descarga del

hidrógeno. Presenta problemas de seguridad y deterioro del material, así como una baja densidad de energía.

1.2.5 Hidrógeno como combustible

La tecnología del hidrógeno es una de las alternativas energéticas al petróleo que permitiría sortear los problemas ambientales que plantea el actual uso de combustibles fósiles, que es insostenible, pero sólo en el plazo de varias décadas, y a condición de que se invierta masivamente desde ahora. El hidrógeno puede quemarse directamente para la generación de electricidad mediante turbinas de gas y ciclos combinados o directamente como combustible de motores. Las principales ventajas de este compuesto se centran en el elevado rendimiento que puede alcanzarse y en que el único producto de su combustión es vapor de agua.

Combustión directa

La combustión del hidrógeno con oxígeno puro conduce a la formación de vapor de agua pura:



El principal inconveniente de esta reacción es la alta temperatura desarrollada en la zona de la llama, superior a 3.000 °C, lo que acarrea problemas con los materiales de los equipos. Para solventarlos puede recurrirse a la inyección de agua adicional, lo que permite ajustar la temperatura del vapor al valor deseado, pudiendo obtenerse vapor saturado o sobrecalentado. Otra alternativa es recurrir al empleo de catalizadores basados en platino (combustión catalítica), consiguiendo que la reacción tenga lugar a menores temperaturas. Los gases de combustión producidos pueden llevarse directamente a una turbina de gas o a un ciclo combinado de turbina de vapor/turbina de gas para la generación de electricidad.

Una de las aplicaciones tradicionales del hidrógeno ha sido como combustible de cohetes y transbordadores espaciales. Los programas espaciales son los mayores consumidores de hidrógeno líquido, habiendo adquirido gran experiencia en su manejo que puede ser la base de futuros desarrollos en otros campos. El uso de hidrógeno en motores de combustión interna es un campo que está recibiendo cada vez más atención. El hidrógeno es un excelente combustible, haciendo que los motores basados en este gas sean un 20% más eficaces que los que emplean gasolina. Esta clara diferencia se debe a las características del hidrógeno:

- Su elevada difusividad facilita la formación de mezclas combustible-aire mucho más homogéneas que con cualquier otro combustible.
- Su amplio intervalo de inflamabilidad (4-75%) hace que sea capaz de arder en mezclas pobres. Con ello se consigue una mayor facilidad de arranque (también relacionada con su baja energía de ignición), que la combustión sea más completa y una mejor economía del combustible. Además, la temperatura final de combustión es menor, minimizando la formación de óxidos de nitrógeno.
- Su alta temperatura de auto-ignición permite mayores relaciones de compresión en los pistones, proporcionando mayores eficacias térmicas.

El principal inconveniente del hidrógeno es su baja densidad energética volumétrica (energía/volumen) que lleva a la necesidad de grandes tanques de almacenamiento y a que la mezcla estequiométrica aire/combustible en los cilindros del motor tenga un menor contenido energético, produciéndose una pérdida de potencia. Este factor también limita el

contenido en hidrógeno en dicha mezcla, no permitiendo que ésta sea demasiado pobre. El uso de técnicas avanzadas de inyección del combustible o de hidrógeno líquido podría ser una mejora para estos problemas.

Pilas de Combustible

La aplicación energética de mayor interés en la actualidad para el hidrógeno reside en las pilas de combustible. Se trata de equipos formados por un stack (pila) de celdas que actúan como dispositivo electroquímico que, a través de la reacción de un combustible (en este caso hidrógeno) con un comburente (en este caso oxígeno), convierte directamente la energía química en energía eléctrica, sin procesos de combustión intermedios y por lo tanto con un alto rendimiento.

1.3 La pila de combustible

Las células o pilas de combustible son dispositivos que permiten la conversión de la energía química de una sustancia en energía eléctrica y calor mediante un proceso electroquímico. Este proceso fue descubierto por Sir William Robert Grove en 1839 pero no fue hasta 1935 cuando Francis Thomas Bacon logra desarrollar la primera pila de combustible. Esta transformación utiliza directamente la energía libre disponible en el combustible a su temperatura de operación y no está limitada por el ciclo de Carnot, alcanzando rendimientos superiores a los procesos convencionales.

El cambio en la energía libre de Gibbs de la reacción está relacionado con el voltaje de la pila según:

$$\Delta G = n \cdot F \cdot \Delta V \quad (1.2)$$

Donde n es el número de electrones implicados en la reacción, y ΔV es el voltaje generado. En los procesos convencionales, la energía química del combustible se transforma en primer lugar en energía térmica de un fluido, posteriormente en energía mecánica de un eje (turbina o motor) y finalmente en energía eléctrica. En las pilas, se pasa directamente de energía química a eléctrica sin las conversiones intermedias de energía térmica o mecánica. Además, el combustible y oxidante no reaccionan en un proceso rápido de combustión sino que reaccionan por etapas en electrodos separados, uno positivo (cátodo) y otro negativo (ánodo). Un electrolito separa los dos electrodos y la velocidad de reacción queda limitada por el tiempo que tardan las especies en difundirse entre los electrodos a través del electrolito y por la cinética de la reacción. Las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que las últimas se pueden considerar dispositivos de almacén de la energía, en función de la cantidad de reactivos químicos que tiene la batería. Cuando estos reactivos se agotan, la batería deja de producir energía eléctrica, mientras que la pila se alimenta de forma continua.

En principio, cualquier compuesto químico susceptible de oxidación y reducción química que pueda alimentarse de forma continua a la pila puede utilizarse como combustible y oxidante, respectivamente. Los más utilizados hasta el momento son el hidrógeno (combustible) que se alimenta al ánodo y el oxígeno (oxidante) al cátodo. El hidrógeno suministrado a la pila se difunde a través del ánodo poroso y activado por un catalizador reacciona sobre la superficie del ánodo con los iones OH^- , formando agua y liberando electrones libres. En el funcionamiento de las pilas, los gases pasan al electrolito a través de los poros de los electrodos (oxidante en el cátodo y combustible en el ánodo) de forma que se obtiene

una interfase reactivos–electrolito–electrodo que desempeña un papel fundamental en el comportamiento de la pila. La cantidad de electrolito en dicha interfase es un factor clave puesto que controla la velocidad de difusión de los gases e iones presentes en la pila. En el proceso electroquímico también se libera energía en forma de calor, en mayor o menor cantidad según el tipo de pila, lo que permite la posibilidad de utilizar la cogeneración (generación simultánea de electricidad y calor). La producción simultánea de electricidad en la pila y el aprovechamiento del calor generado bien para obtener más energía eléctrica (en una turbina) o para suplir las necesidades térmicas de la instalación donde esté ubicada la pila permite obtener una mayor eficiencia global.

Entre las ventajas que presenta este tipo de dispositivos, destacan:

- Bajo impacto medioambiental. Al no haber combustión a alta temperatura, no se producen hidrocarburos sin oxidar, ni óxidos de nitrógeno. Asimismo, al ser un sistema de alta eficiencia, las emisiones de dióxido de carbono por KWh se reducen drásticamente. Si el hidrógeno se obtiene a partir de fuentes renovables las emisiones netas serían nulas. En aplicaciones portátiles y de transporte, sólo se emite agua como producto, en el punto de utilización de la energía.
- Por otro lado y debido a que no tiene partes móviles, el nivel de contaminación acústica es muy reducido (<45 db a 10 m) y puede ubicarse en lugares densamente poblados.
- Eficiencia. Son más eficientes que cualquier sistema convencional ya que no están sujetas a las restricciones del factor de Carnot. Desde un punto de vista práctico, teniendo en cuenta todas las pérdidas del sistema real, se pueden llegar a alcanzar eficiencias del 75 %.
- Flexibilidad de operación. Una pila de combustible genera una tensión entre 0,5 y 1 V y puede ser conectada en serie con otras unidades para obtener la tensión deseada.
- Flexibilidad de combustibles. El hidrógeno que se alimenta a la pila puede ser obtenido a partir de una amplia variedad de procedimientos y combustibles primarios, así como a partir de fuentes de energía renovables.
- Bajo mantenimiento. Debido a que no tiene partes móviles como las máquinas de combustión interna.

Entre las desventajas, destacan:

- Los problemas de producción, transporte, distribución y almacenamiento de las cantidades de hidrógeno que hacen falta no están todavía resueltos.
- Elevados costes de operación y de fabricación de las pilas.
- Vida limitada de la pila.
- La carga de combustible y puesta en marcha de los vehículos basados en pilas de combustible no es tan rápida como en el caso de los motores de combustión interna.
- La tecnología no está todavía lo suficientemente desarrollada y no hay muchos productos comerciales disponibles.

1.3.1 Tipos de pilas de combustible

Las pilas de combustible se pueden clasificar en base a diferentes criterios tales como: tipo de combustible y oxidante, tipo de electrolito, temperatura, sistema de alimentación de reactivos a la pila y lugar donde se procesa el combustible. La clasificación más utilizada es la referente al tipo de electrolito, que a su vez condiciona la temperatura de operación de la pila, los materiales que pueden usarse, el tiempo de vida y las reacciones que tienen lugar en los electrodos. Los diferentes tipos de células de combustible, actualmente en diferente fase de desarrollo, son fundamentalmente seis:

- Alcalinas (AFC, *Alkaline Fuel Cell*): Usan como electrolito una disolución de KOH concentrada (85%) para operación a alta temperatura (250 °C) o menos concentrada (35-50%) para trabajar a menores temperaturas (<120 °C). Al ser un electrolito líquido se impregna en una matriz, normalmente asbesto. Los electrodos contienen cantidades elevadas de metales nobles tales como platino/paladio u oro/platino. Existe un amplio abanico de electrocatalizadores que pueden usarse (níquel, plata y óxidos metálicos). Este tipo de células no permiten la presencia de dióxido de carbono en el combustible o en el oxidante, puesto que pueden producir la carbonatación del combustible.
- Ácido fosfórico (PAFC, *Phosphoric Acid Fuel Cell*): El electrolito es ácido fosfórico concentrado (aprox. 100%) impregnado en una matriz (habitualmente de carburo de silicio) y operan a temperaturas comprendidas entre 150–220 °C. Los electrodos son de platino soportado normalmente sobre carbón y tienen elevada sensibilidad al envenenamiento por monóxido de carbono (toleran una concentración inferior al 1,5%). El vapor de agua producido puede usarse para cogeneración. En cuanto a las desventajas, se pueden citar: el uso de platino por su alto precio, menor capacidad de generación que otras células y un mayor tamaño y peso.
- Poliméricas o de membrana (PEFC, *Polymer Electrolyte Fuel Cell*; PEMFC, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*): Usan una membrana polimérica fina como electrolito (normalmente de ácidos sulfónicos perfluorados) que debe estar hidratada para permitir la conducción de los protones. Se han desarrollado membranas de 12-20 micras, que son excelentes conductoras de protones. La membrana está recubierta en ambas caras con partículas de metales o aleaciones metálicas muy dispersas, que son los catalizadores. El catalizador más usado es platino soportado sobre carbón (con cargas de 0,3 mg/cm²), o si el hidrógeno tiene trazas de monóxido de carbono se emplean aleaciones de platino y rutenio. Estas células trabajan a temperaturas relativamente bajas (60–100 °C), soportan altas densidades de corriente y son adecuadas en aplicaciones donde se necesitan respuestas rápidas a cambios en la demanda, como en los automóviles.
- Óxidos sólidos (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*; IT-SOFC, *Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*): Utilizan como electrolito un óxido metálico no poroso, normalmente ZrO₂ estabilizado con Y₂O₃. El sistema trabaja a 900-1.000 °C, produciéndose la conducción iónica por los iones oxígeno. El ánodo es una mezcla de metal de níquel y óxido de circonio y el cátodo de manganita de lantano con estroncio o selenio. Puede usarse para aplicaciones de alta energía, incluyendo centrales de generación eléctrica industriales de gran tamaño. Las eficiencias pueden alcanzar el 60% y el 85% con cogeneración.

- Carbonatos fundidos (MCFC, *Molten Carbonate Fuel Cell*). El electrolito es una combinación de carbonatos de litio, sodio y/o potasio, impregnados en una matriz cerámica de aluminato de litio (LiAlO₂). Trabajan a 600-700 °C, ya que en este intervalo los carbonatos forman una sal fundida altamente conductora, proporcionando los aniones carbonato la conducción iónica. Debido a la elevada temperatura, no se necesitan metales nobles para las reacciones de oxidación y reducción, utilizándose níquel dopado con cromo o aluminio en el ánodo y óxido de níquel con litio en el cátodo. Se pueden alcanzar eficacias del 70 %, además de la posibilidad de realizar cogeneración con el calor residual producido. Admiten dióxido y monóxido de carbono como oxidantes, con lo que pueden utilizarse con hidrógeno obtenido a partir de combustibles fósiles.
- Metanol directo (DMFC, *Direct Methanol Fuel Cell*). Son similares a las PEMFC puesto que tienen una membrana para separar los electrodos. Sin embargo utilizan un electrocatalizador en el ánodo para obtener hidrógeno a partir del metanol, eliminando la necesidad del reformador del combustible. Como electrocatalizadores se utilizan mezclas de metales como platino/rutenio o platino/estaño. Estas pilas trabajan a temperaturas bajas, similares a las PEMFC aunque un poco superiores para aumentar la densidad de potencia. La opción del metanol como combustible es muy atractiva puesto que puede obtenerse a partir de gas natural o biomasa y tiene una densidad energética específica muy alta.

	REACCIÓN ANÓDICA	ELECTROLITO	REACCIÓN CATÓDICA
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
AFC	$H_2 + 2(OH^-) \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH^-)$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH^-)$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O_2^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$H^+ \rightarrow$	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$

Figura 1.2 Reacciones en los distintos tipos de pilas.

1.3.2 Aplicaciones de las pilas de combustible

Estacionarias

Las aplicaciones estacionarias se realizan en sistemas y plantas de producción de energía eléctrica. Se pueden emplear en una gran variedad de aplicaciones con un gran intervalo de potencia (del orden de vatios a megavatios). Las pilas que operan a baja temperatura tienen la ventaja de un menor tiempo de puesta en marcha y las que operan a alta tienen la ventaja de la posibilidad de cogeneración (obtención simultánea de energía eléctrica y térmica). Las pilas de menor potencia (inferior a 1 KW) son útiles para suministrar potencia a equipos que trabajan en estacionario en lugares aislados, núcleos rurales o montañosos

en los cuales no es rentable hacer llegar el tendido eléctrico. Las elevadas densidades de potencia de las pilas de combustible permiten unos tiempos de operación superiores a las baterías convencionales. Además, dado el carácter modular de las pilas y a que se pueden alimentar en continuo, se pueden satisfacer variaciones en la demanda de potencia. En este caso se suelen utilizar pilas del tipo PEM, SOFC y PAFC. Para potencias medias (1–10 KW) se utilizan pilas en edificios y residencias en núcleos urbanos y rurales. En la mayoría de los casos se utilizan con cogeneración para obtener agua caliente y/o calefacción. En estas aplicaciones las pilas más utilizadas son las PEMFC utilizando como combustible gas natural, propano, y en algún caso aislado, hidrógeno. Finalmente, las plantas de producción de energía eléctrica de mayor potencia (10 KW–100 MW) utilizan generalmente gas natural como combustible y mayoritariamente se utilizan pilas del tipo SOFC y MCFC. Frente a las centrales convencionales, las basadas en pilas tienen la ventaja de que su eficiencia no depende del tamaño con lo cual se pueden construir plantas de producción más compactas y con menores costes de producción que las convencionales. Las plantas de potencias inferiores a 1 MW pueden utilizar cogeneración, se pueden utilizar con cualquiera de los seis tipos de pilas mencionados anteriormente y se suelen ubicar en la propia instalación de consumo. Las instalaciones de mayor potencia se utilizan para generación distribuida y se ubican próximas a los usuarios finales.

Móviles

Las aplicaciones móviles se realizan en motores de vehículos para el transporte terrestre, propulsión de barcos y submarinos, así como naves espaciales. El desarrollo de estas aplicaciones surge como consecuencia de la necesidad creciente de disponer de vehículos más eficientes en el uso de la energía y más limpios en sus emisiones. En el caso de las pilas, utilizando hidrógeno como combustible, las emisiones en el punto de aplicación son nulas y las eficiencias de las pilas actuales bastante elevadas. Cuando se utilizan otros combustibles, es necesario añadir al vehículo un sistema de transformación del combustible utilizado en hidrógeno. En este caso, sí se emiten gases contaminantes tales como monóxido de carbono, así como gases de efecto invernadero, pero en menores cantidades que con los motores de combustión interna. Así pues, los vehículos de pilas tienen las ventajas de los motores eléctricos y además son más silenciosos, ya que no tienen partes móviles, y con menores costes de mantenimiento. Para esta aplicación el tamaño y peso de la pila es un factor crítico así como conseguir tiempos de respuesta rápidos y tiempos de puesta en marcha reducidos. El tipo de pila más utilizado en esta aplicación es de PEMFC. Las pilas AFC también se han propuesto como alternativas en vehículos híbridos. Actualmente se está contemplando la utilización de metanol, etanol y gas natural como combustibles primarios pero sin embargo a largo plazo parece más probable la utilización directa de hidrógeno obtenido a partir de fuentes de energía renovables. No obstante, a día de hoy se requiere todavía un esfuerzo importante en desarrollar métodos de obtención de hidrógeno barato y sistemas de almacenamiento y distribución del mismo. La potencia mínima de una pila para un automóvil es de unos 60 KW y los desarrollos realizados hasta el momento se han dirigido hacia reducir el tamaño y peso de las pilas utilizadas, aumentar la potencia y desarrollar sistemas de almacenamiento y procesado del combustible. En el caso del transporte público, las pilas de combustible han tenido mayor aceptación y se han desarrollado en mayor extensión. Así por ejemplo, la empresa Ballard, líder en el sector de pilas de combustibles, ya presentó un primer prototipo de autobús en 1993 propulsado por una pila PEM utilizando hidrógeno como combustible. En la actualidad, en Madrid hay

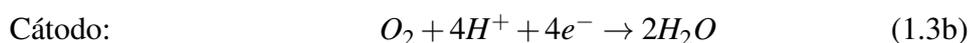
varios autobuses que utilizan una pila PEM que se alimenta directamente con hidrógeno comprimido, que se obtiene por reformado de gas natural en una instalación estacionaria. Hay también aplicaciones de menor potencia (<10 KW) para motocicletas, vehículos pequeños de desplazamiento en zonas de recreo y barcos de recreo. Los combustibles utilizados son metanol, propano y algún hidrocarburo líquido derivado del Gas Natural.

Portátiles

Las aplicaciones portátiles se utilizan para fuentes de alimentación en equipos de pequeño tamaño tales como ordenadores portátiles, teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos portátiles cuyo número y variedad crecen continuamente. Todos estos equipos se caracterizan porque requieren fuentes de alimentación de baja potencia por lo que tradicionalmente se vienen utilizando baterías convencionales, recargables o de un solo uso. Recientemente se han comenzado a desarrollar pilas de combustible para estas aplicaciones ya que éstas tienen una mayor vida útil, se alimentan en continuo y tienen un menor impacto contaminante. Sin embargo todavía hay que superar determinadas barreras tecnológicas, siendo la más importante la reducción en el tamaño de las pilas para que pueda ubicarse en espacios tan pequeños como 1 mm. Además, tienen que operar con buenas eficiencias a temperatura y presión ambiente. Por razones de seguridad y almacenamiento, en este caso no se recomienda el uso del hidrógeno como combustible primario. Los sistemas desarrollados actualmente se basan en pilas de metanol directo (DMFC) de baja potencia y con catalizadores que permiten trabajar a temperatura ambiente.

1.3.3 La pila de hidrógeno

Mediante una reacción química se produce una diferencia de tensión que podemos usar para obtener energía eléctrica. En el caso de una celda de hidrógeno, se trata de la reacción de oxígeno en el cátodo con hidrógeno en el ánodo, separados por una membrana. Al conectar una carga eléctrica solicitamos una corriente a la celda, ajustándose la tensión de la misma conforme a su curva característica. El resultado, además de la potencia eléctrica generada, es calor y agua como único desecho. La reacción sigue el siguiente esquema:



En la Figura 1.3 se representa el proceso de forma simple. Es, por tanto, como una pila galvánica desde el punto de vista de la transformación de energía química-eléctrica, pero como un generador al utilizar un combustible, el hidrógeno, para ello. Sin embargo, a diferencia de los generadores de explosión, no produce contaminantes.

El hidrógeno no es una fuente de energía en sí mismo, pues no se puede capturar de la naturaleza de forma directa. Para generarlo, es necesario un proceso que requiere a su vez de consumo de energía. El hidrógeno actúa, por tanto, como almacenador de energía, liberada y transformada en electricidad gracias a las celdas de combustible. Una sola celda es capaz de generar una potencia limitada, por lo que para la obtención de potencias mayores se agrupan varias en una configuración en serie, dando lugar a una pila de combustible o *fuel cell stack* (FCS). La pila a su vez se encuentra, en su forma final, acompañada de un sistema de control y de regulación de los distintos procesos que hacen posible su correcto y seguro

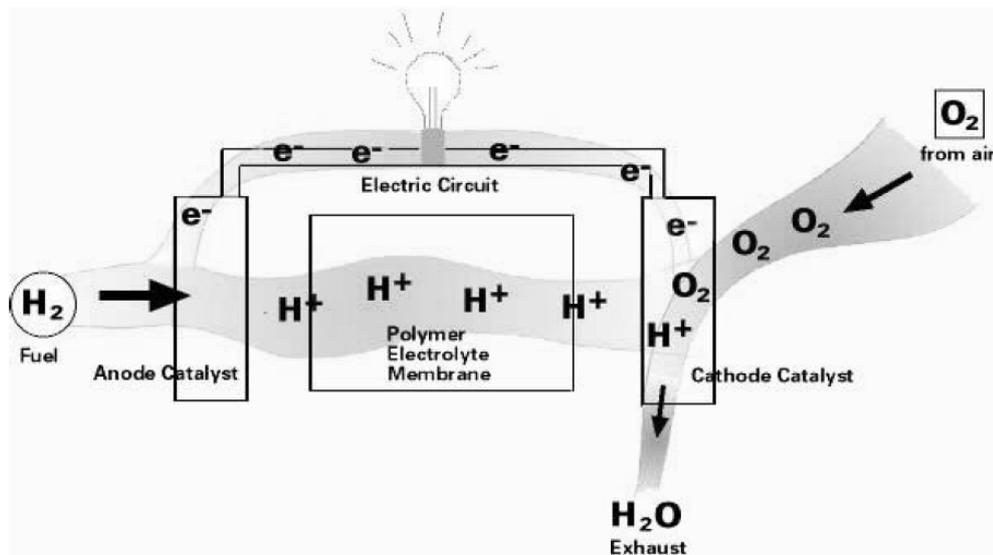


Figura 1.3 Modelo básico de una pila de hidrógeno.

funcionamiento, es decir, flujo y purga del H_2 , compresión del aire ambiental, entrega de potencia eléctrica, control de temperatura, inicio y parada, gestión de errores, etc.

Uno de los mayores obstáculos a la penetración en el mercado de este tipo de generadores frente a los de combustibles fósiles es su menor eficiencia, ya que su rendimiento es aproximadamente la mitad del obtenido con la combustión de la misma cantidad de H_2 . Asimismo, su velocidad de respuesta ante picos de demanda es menor. Por su analogía con las baterías, que constan asimismo de celdas en serie (en su caso galvánicas), suponen una de las vías a desarrollar para suplir o complementar las deficiencias de las mismas (principalmente la autonomía).

1.4 Baterías

Se denomina batería o acumulador eléctrico al dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad. Este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. El funcionamiento de un acumulador está basado esencialmente en algún tipo de proceso reversible, cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierden, sino que meramente se transforman en otros, que a su vez puedan retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante el de carga. Un acumulador es, así, un dispositivo en el que la polarización se lleva a sus límites alcanzables, y consta, en general, de dos electrodos, del mismo o de distinto material, sumergidos en un electrolito.

1.4.1 Tipos de baterías

En lo que a su naturaleza interna se refiere, se encuentran habitualmente en el comercio acumuladores de los siguientes tipos:

- **Batería de plomo:** está constituida por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo incrustado en una matriz de plomo metálico. El electrolito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles.
- **Batería alcalina:** también denominada de ferróniquel, sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso, que constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso, el negativo, estando formado el electrolito por una disolución de potasa cáustica. Durante la carga se produce un proceso de oxidación anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Se utilizan para aparatos complejos y de elevado consumo energético. En sus versiones de 1,5 V, 6 V y 12 V se emplean, por ejemplo, en mandos a distancia (control remoto) y alarmas.
- **Batería alcalina de manganeso:** con un contenido de mercurio que ronda el 0,1 % de su peso total, es una versión mejorada de la pila anterior, en la que se ha sustituido el conductor iónico cloruro de amonio por hidróxido potásico (de ahí su nombre de alcalina). El recipiente de la pila es de acero, y la disposición del zinc y del óxido de manganeso es la contraria, situándose el zinc, ahora en polvo, en el centro. La cantidad de mercurio empleada para regularizar la descarga es mayor. Esto le confiere mayor duración, más constancia en el tiempo y mejor rendimiento. Por el contrario, su precio es más elevado. También suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V. Se utiliza en aparatos de mayor consumo como: grabadoras portátiles, juguetes con motor, flashes electrónicos.
- **Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH):** utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Cada célula de Ni-MH puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,8 y 2,3 Ah. Su densidad de energía llega a los 80 Wh/Kg. Este tipo de baterías no se encuentran afectadas por el llamado efecto memoria, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad (a causa de un tiempo largo, una alta temperatura, o una corriente elevada), imposibilitando el uso de toda su energía.
- **Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd):** utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Cada célula de NiCd puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,5 y 2,3 Ah. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/Kg, lo que hace que tengan que ser recargadas cada poco tiempo. También se ven afectadas por el efecto memoria.
- **Baterías de iones de litio (Li-ion):** las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a densidades del orden de 115 Wh/Kg. Además, no sufren el efecto memoria.

- Baterías de polímero de litio (Li-poli): son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, como los “manos libres” *Bluetooth*.

Como se ha visto, las baterías contienen metales pesados y compuestos químicos, muchos de ellos perjudiciales para el medio ambiente. Es muy importante no tirarlas a la basura (en la mayoría de los países eso no está permitido), y llevarlas a un centro de reciclado.

La pila de combustible es capaz de generar gran cantidad de energía por hora y Kg, pero con una densidad de potencia reducida, y una dinámica de funcionamiento relativamente lenta, en comparación con otros sistemas. Sin embargo, no se trata de un sistema de almacenamiento, sino que inyectándole el combustible que requiere, generará energía de forma continua. La batería no genera tanta energía por hora y Kg como una pila de combustible, pero su densidad de potencia es mayor, y su dinámica de funcionamiento también, lo que permite suministrar energía a sistemas que requieren una velocidad de respuesta mayor. A diferencia de las pilas, se pueden agotar, requiriendo ciclos de carga y descarga para mantener su funcionamiento hasta finalizar su vida útil.

1.5 Definición de vehículo eléctrico

Vehículo de combustible alternativo impulsado por uno o más motores eléctricos. La tracción puede ser proporcionada por ruedas o hélices impulsadas por motores rotativos, o en otros casos utilizar otro tipo de motores no rotativos, como los motores lineales, los motores inerciales, o aplicaciones del magnetismo como fuente de propulsión, como es el caso de los trenes de levitación magnética.

1.5.1 Referencia histórica del coche eléctrico

Primeras referencias

La propulsión eléctrica ha sido una opción muy utilizada históricamente para vehículos de transporte tales como locomotoras, tranvías y trolebuses, casos en los que la energía podía ser suministrada a través de catenarias, vías, etc. Pasó medio siglo desde la aparición de los primeros vehículos eléctricos hasta que se desarrollaron baterías que podían ser usadas en vehículos eléctricos de desplazamiento libre. A finales del siglo diecinueve, con la producción en masa de las baterías recargables, se extendió ampliamente el uso de los vehículos eléctricos.

A principios del siglo veinte, los vehículos de carretera eléctricos tenían un futuro prometedor. De hecho, si se requería rendimiento, el coche eléctrico era el preferido en lugar de los vehículos con motor de combustión interna o propulsados por vapor. El coche eléctrico era relativamente seguro y se encendía instantáneamente, mientras que los vehículos con motor de combustión interna eran por aquel entonces inseguros, malolientes y tenían que ser arrancados con una manivela. Sobre 1920, varios cientos de miles de motores eléctricos habían sido producidos para su uso en coches, furgonetas, vehículos de carga y autobuses. Sin embargo, a pesar de lo prometedor de sus comienzos, la caída de precio del petróleo junto a la aparición del motor de combustión de autoencendido

(inventado en 1911), hicieron de esta última una opción más interesante. Irónicamente, desde entonces, el principal mercado para las baterías recargables ha sido su aplicación al arranque de los motores de combustión interna. Las razones del gran éxito hasta ahora de los vehículos con motor de combustión interna vienen motivadas por la mayor energía específica del petróleo respecto a la de las baterías, el tiempo que suponía la recarga de las baterías, el precio y la autonomía.

Mediados del siglo XX

Se mantuvo durante este periodo la tendencia que se pudo observar a principios de siglo. La propulsión eléctrica siguió siendo la preferida en trenes por el bajo mantenimiento que suponían. Aunque en tranvías y trolebuses cayó en desuso por el aumento del número de subestaciones de repostaje y el bajo precio del petróleo. Los vehículos eléctricos de desplazamiento libre no llegaron a alcanzar el éxito de los trenes, los cuales podían tomar la energía de los raíles o las catenarias y no necesitaban baterías. Los vehículos eléctricos tenían ciertas ventajas sobre los vehículos con motor de combustión, principalmente que no emiten gases de combustión en el entorno de utilización y que eran menos ruidosos y molestos. Esto hacía de los vehículos eléctricos la alternativa ideal para entornos como almacenes, interiores de edificios o campos de golf donde la presencia de contaminación y ruido era muy molesta.

Desarrollos hacia final del siglo veinte y comienzos del siglo XXI

En lo que respecta a los trenes, la utilización de los motores eléctricos en los mismos ha aumentado su solidez, haciendo especial énfasis en el desarrollo de trenes de alta velocidad. Trenes como el tren bala (Shinkansen) en Japón, el TGV francés o los trenes basados en levitación magnética (“maglev”) son un ejemplo de ello. Por otro lado, los tranvías han reaparecido en algunas ciudades. Probablemente el mayor cambio en los vehículos eléctricos de los últimos años haya sido el desarrollo de las baterías de litio, que poseen una energía específica razonable y un tiempo de carga más corto que sus antecesoras. Esto ha permitido la creación de una serie de vehículos comerciales como el Tesla Sport, o algunos más recientes fabricados por grandes marcas como por ejemplo el Nissan Leaf o el Mitsubishi MiEv. Ha habido un resurgir del coche híbrido comenzando por aquellos no recargables como el Toyota Prius. Recientemente General Motors ha desarrollado Volt, un híbrido recargable que puede completar viajes de media distancia usando electricidad y recurriendo al motor de combustión para los trayectos largos.

1.5.2 Vehículos híbridos

Millones de vehículos expulsan a diario toneladas de sustancias tóxicas al aire y a pesar de los intentos por reducir la polución, el problema se agrava porque el número de coches crece continuamente. Varios informes europeos alertan de esta situación, de los peligros para la salud. Incluso en algunas ciudades, los niveles de contaminación son tan altos que está siendo necesario aplicar restricciones al tráfico. Las gasolinas y gasóleos que consumen los coches producen al quemarse gases contaminantes que contienen sustancias muy dañinas para la salud. Una estimación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) asegura que “80000 adultos de más de 35 años mueren cada año en las ciudades europeas por este motivo”. Problemas respiratorios, cardiovasculares o cáncer pueden estar causados o verse agravados por la contaminación. El problema es de escala mundial y ha dado lugar a compromisos internacionales, como los de Kyoto de 1997, y a nivel europeo, como la

normativa EURO y los planes de movilidad urbana. Una de las posibles soluciones al problema pasa por el empleo de energías renovables para la propulsión de los vehículos. Así es como nacen los vehículos de propulsión alternativa, es decir, híbridos, que si bien el concepto implica a una propulsión por energía eléctrica proveniente de baterías, y de un motor de combustión interna, el mismo sistema de propulsión alternativo puede darse con una pila de combustible en vez del motor de combustión interna, reduciendo aún más el nivel de contaminación.

Existen dos tipos de vehículos híbridos, el eléctrico y el enchufable. Se diferencian en que el segundo puede enchufarse a la red eléctrica para recargar las baterías del sistema.

Visión global

Actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre pilas de combustible y baterías, en general estudios impulsados por la industria automovilística en la búsqueda del diseño y el desarrollo de vehículos eléctricos, o híbridos. El objetivo principal es la reducción del consumo del combustible, gasolina o hidrógeno, y la disminución del nivel de contaminación. Un inconveniente que hay que tener en cuenta en estos desarrollos es que el sistema diseñado podría reducir la emisión de contaminantes incluso a cero, pero no será realmente respetuoso con el medio ambiente si lo que ha ocurrido en realidad es que el proceso contaminante se lo ha llevado al punto de fabricación o de producción del combustible. Así, lo que no contamina el vehículo, lo contamina la fábrica, y esta estrategia no es viable si la intención es la reducción de emisiones a nivel global.

La estrategia de propulsión eléctrica por baterías puede ser contaminante si la recarga de las mismas se realiza con energía contaminante, dependiendo ésta de la generación de electricidad en la central. La estrategia híbrida con combustión interna es factible porque se reduce a la mitad el nivel de contaminación. Solo la estrategia híbrida con pila de combustible reduce en gran medida la emisión contaminante. A pesar de todo, la utilización de baterías siempre llevará ligado cierto nivel de contaminación debido a los materiales que utilizan.

Visión comercial

Los vehículos híbridos empezaron a asaltar el mercado hace unos años, con coches como el Toyota Prius, y actualmente otras compañías están incluyendo sus modelos en la competencia por un sector emergente que por el momento tiene más calado en Estados Unidos o en Japón. De momento las estrategias que están teniendo viabilidad comercial son los enchufables con propulsión por baterías y los híbridos con propulsión interna. Actualmente la estrategia con pila de combustible no está desarrollándose a la misma velocidad porque depende de más factores, sobre todo en lo que respecta al hidrógeno: las dificultades de su producción y su almacenamiento. Los que sí existen ya son modelos factibles a nivel comercial, aunque aún dependan del desarrollo de la economía del hidrógeno.

Vehículos híbridos con pila de hidrógeno

La tecnología del hidrógeno se ha desarrollado para dar a luz vehículos eléctricos híbridos, que son aquellos que se basan en baterías que proporcionan potencia a un motor eléctrico y otra fuente de la que se obtiene energía a partir de un combustible, que puede ser un motor de combustión interna, o una pila de combustible, que usa el hidrógeno como combustible para producir la energía eléctrica complementaria a la de las baterías. De esta manera se dota al vehículo de una mayor autonomía permitiendo la recarga de las baterías incluso cuando el vehículo se encuentra en movimiento. Si a la ventaja de la autonomía añadimos

que el vehículo eléctrico híbrido con pila de combustible se desprende de la histórica dependencia de los combustibles fósiles con el sector transporte con lo que esto significa para el medioambiente, y además consigue una eficiencia energética superior el único requisito que falta es la inversión económica de gobiernos y empresas para acercar el futuro un poco más al presente.

Los dispositivos necesarios en un vehículo eléctrico híbrido con pila de combustible son:

- Motor eléctrico. Generalmente trabaja en AC y necesita una electrónica avanzada que le permite funcionar como motor o como generador.
- Inversor. Convierte la DC aportada por las baterías o la pila de combustible a AC para alimentar el motor eléctrico.
- Frenado regenerativo. Cuando se frena el motor eléctrico funciona como generador, normalmente esta energía se recupera almacenándose en las baterías o en los supercondensadores si son picos demasiado abruptos de potencia. Decir que siempre se comparte el frenado regenerativo con el convencional por razones de seguridad.
- Baterías. Las baterías necesitan tener una alta densidad de energía y larga vida útil que soporte las numerosas recargas y descargas.
- Supercondensadores. Poseen una alta densidad de potencia lo que les permite almacenar picos de potencia que las baterías no pueden atender.
- Pila de combustible. Fuente de energía adicional que podrá alimentar directamente al motor, previo paso por el inversor, o bien ir recargando baterías sobre la marcha dotando al sistema de mayor autonomía.

Las ventajas que presentan este tipo de vehículos son muy variadas, van desde la disminución del ruido a una respuesta más inmediata y mayor par que un vehículo convencional. Si a esto añadimos la mayor autonomía, el consumo inferior, recarga más rápido que un eléctrico, y sobretodo el respeto con el medioambiente no es de extrañar que las primeras marcas automovilístico ya dispongan de algunos modelos como los que se exponen a continuación.

Tabla 1.1 FIAT Panda - FC de Nuvera.

Propulsión	FC de stack triple
Potencia	Motor de 60 KW
Aceleración	0 a 50 Km/h en 5 s
Velocidad máx.	125 Km/h
FC	Maletero
Tanque de H ₂	Bajo asientos
Autonomía	190 Km

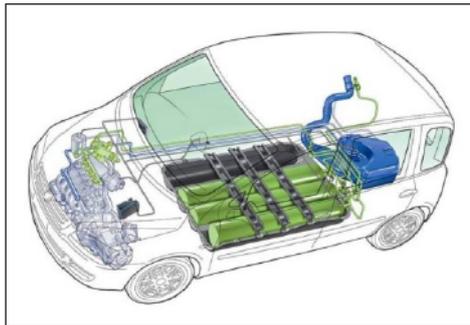


Tabla 1.2 NISSAN X-Trail FCV.

Propulsión	FC propia de Nissan y baterías de Ion Litio
Potencia	Motor de 90 KW
Velocidad máx.	145 Km/h
FC	Bajo asientos delanteros
Tanque de H ₂	Bajo asientos traseros
Presión de tanques	10000 psi (690 bar)
Autonomía	500 Km



Tabla 1.3 HONDA FCX Clarity.

Propulsión	FC de 100KW y baterías de Ion Litio
Potencia	Motor de 95 KW
Velocidad máx.	160 Km/h
FC	Bajo asientos delanteros
Tanque de H ₂	Maletero
Presión de tanques	5000 psi (345 bar)
Autonomía	440 Km

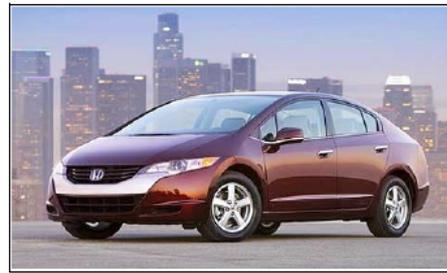
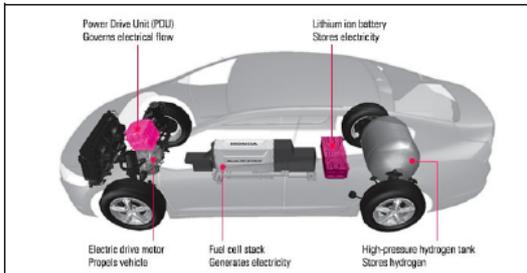


Tabla 1.4 TOYOTA FCHV.

Propulsión	PEMFC de 90 KW y baterías de Metal-Niquel de 21 KW
Potencia	Motor de 80 KW
Velocidad máx.	155 Km/h
FC	Bajo asientos delanteros
Tanque de H ₂	Maletero
Presión de tanques	10000 psi (690 bar)
Autonomía	800 Km

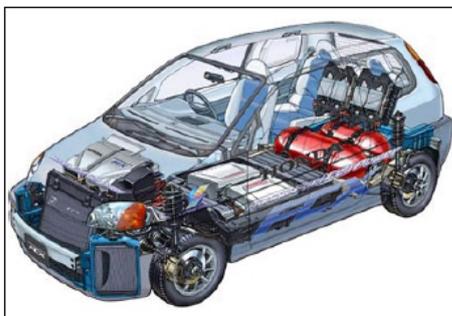


Tabla 1.5 BMW Hydrogen 7.

Propulsión	Combustión interna y FC
Potencia	Motor de 190 KW
Velocidad máx.	230 Km/h
FC	Bajo el capó
Tanque de H ₂	Maletero
Presión de tanques	Hidrógeno líquido
Autonomía	680 Km

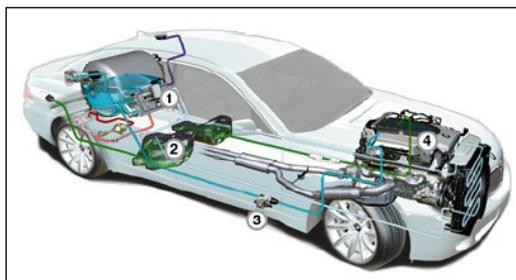


Tabla 1.6 Daimler Chrysler Mercedes-Benz B-Class F-Cell.

Propulsión	PEMFC de Ballard
Potencia	Motor de 100 KW
Velocidad máx.	132 Km/h
FC	Bajo asientos delanteros
Tanque de H ₂	Bajo asientos traseros
Presión de tanques	5000 psi (345 bar)
Autonomía	400 Km

