



Estudio de la utilización del hidrógeno en la industria automotriz: Revisión

Study of the use of hydrogen in the automotive industry: A Review

Estudo do uso do hidrogênio na indústria automotiva: Uma revisão

Abrahan Mesias Jorque-Rea ^I

ajorque@istct.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4235-9604>

Ángel Xavier Arias-Pérez ^{II}

axarias@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1070-2850>

Darío Xavier Borja-Soto ^{III}

dborja@istct.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5160-4769>

Andrés Sebastián Moreno-Constante ^{IV}

amoreno@istct.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1509-2329>

Correspondencia: ajorque@istct.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de agosto de 2022 * **Aceptado:** 28 de septiembre de 2022 * **Publicado:** 20 de octubre de 2022

- I. Ingeniero Automotriz, Magíster en Sistemas Automotrices, Instituto Superior Universitario Central Técnico ISUCT, Quito, Ecuador.
- II. Ingeniero Automotriz, Magíster en Diseño Mecánico, Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, Ecuador.
- III. Ingeniero Automotriz, Magíster en Sistemas de Manufactura, Instituto Superior Universitario Central Técnico ISUCT, Quito, Ecuador.
- IV. Ingeniero Automotriz, Magíster en Sistemas de Manufactura, Instituto Superior Universitario Central Técnico ISUCT, Quito, Ecuador.

Resumen

En este estudio, se presenta una descripción general del hidrógeno y su uso en la industria automotriz, a medida que se agotan los combustibles fósiles el precio de la energía está aumentando rápidamente, es menester el desarrollo de soluciones de propulsión ecológica para satisfacer la demanda social y ambiental. El uso de hidrogeno como combustible está experimentando un impulso sin precedentes que podría establecer las bases para hacer realidad su enorme potencial como energía limpia. Es así que se presenta una evaluación de diferentes tecnologías de producción de hidrógeno basadas en materias primas renovables y/o energías renovables. Como ocurre con la mayoría de las innovaciones tecnológicas, las fases iniciales de desarrollo y despliegue suelen depender de las políticas gubernamentales y sus iniciativas. En países fabricantes de vehículos en los que se invierte en investigación y desarrollo de las pilas de combustible, se han estableciendo subvenciones a medio y a largo plazo. El uso del hidrógeno en vehículos se ha clasificado en dos categorías principales como: diseños en los que se quema hidrógeno en un motor de combustión interna ICE y los que generan energía mediante la conversión a electricidad.

Palabras clave: Hidrógeno; Celda de combustible; Vehículo eléctrico.

Abstract

In this study, an overview of hydrogen and its use in the automotive industry is presented, as fossil fuels are depleted, the price of energy is increasing rapidly, the development of ecological propulsion solutions is necessary to meet the social demand. and environmental. The use of hydrogen as a fuel is experiencing an unprecedented boost that could lay the groundwork for realizing its enormous potential as clean energy. Thus, an evaluation of different hydrogen production technologies based on renewable raw materials and/or renewable energies is presented. As with most technological innovations, the initial phases of development and deployment often depend on government policies and initiatives. In vehicle manufacturing countries that invest in research and development of fuel cells, subsidies have been established in the medium and long term. The use of hydrogen in vehicles has been classified into two main

categories: designs that burn hydrogen in an ICE internal combustion engine and those that generate power by converting it to electricity.

Keywords: Hydrogen; fuel cell; electric vehicle

Resumo

Neste estudo, é apresentado um panorama do hidrogênio e seu uso na indústria automotiva, visto que os combustíveis fósseis estão se esgotando, o preço da energia está aumentando rapidamente, o desenvolvimento de soluções de propulsão ecológica é necessário para atender a demanda social e ambiental. O uso de hidrogênio como combustível está experimentando um impulso sem precedentes que pode lançar as bases para a realização de seu enorme potencial como energia limpa. Assim, apresenta-se uma avaliação de diferentes tecnologias de produção de hidrogênio baseadas em matérias-primas renováveis e/ou energias renováveis. Como acontece com a maioria das inovações tecnológicas, as fases iniciais de desenvolvimento e implantação geralmente dependem de políticas e iniciativas governamentais. Nos países fabricantes de veículos que investem em pesquisa e desenvolvimento de células a combustível, foram estabelecidos subsídios a médio e longo prazo. O uso de hidrogênio em veículos foi classificado em duas categorias principais: projetos que queimam hidrogênio em um motor de combustão interna ICE e aqueles que geram energia convertendo-o em eletricidade.

Palavras-chave: Hidrogênio; célula de combustível; veículo elétrico

Introducción

El mundo se está enfrentando a un problema energético que cada día aumenta a medida que el petróleo se acaba. Hoy en día las industrias automotrices se enfrentan a cambios tecnológicos rápidos y difíciles en las tecnologías de fabricación de los motores (Dutta 2014). Con la revolución industrial, el uso generalizado de combustibles fósiles como su principal fuente de energía, emanan óxidos nocivos de carbono, nitrógeno, azufre y otros gases que provocan el calentamiento global (Ball and Weeda 2015). El desarrollo de renovables y anticontaminantes recursos energéticos es importante para mitigar este problema que acarrea ya por varias décadas. Los investigadores han reconocido que el hidrógeno H₂ es una fuente de energía de este tipo. El hidrógeno es una de las principales fuentes de energía limpia, es el elemento más abundante en el universo y tiene un potencial energético muy alto. La energía térmica de combustión del

hidrógeno es igual a 3 veces y 5 veces del metano y carbón respectivamente (Jain, 2009). En la industria automotriz, se están realizando varios estudios para desarrollar vehículos de combustible alternativo en las últimas tres décadas. La primera solución que viene a la mente en este contexto es el hidrógeno, una fuente de energía verde y alternativa que puede solucionar el calentamiento global causado por los combustibles fósiles. El hidrógeno es una fuente de energía que puede quemarse catalíticamente o convertirse en energía eléctrica por medio de una celda de combustible (Dutta 2014). El hidrógeno se puede usar en motores de combustión interna ICE, como combustible principal o como combustible adicional mezclándolo con otros combustibles. Si se utiliza hidrógeno como combustible para un ICE, el motor descarga una pequeña cantidad de vapor de agua junto con otras emisiones post combustión. Considerando que los diseños de vehículos eléctricos de pila de combustible FCEV y la de los vehículos eléctricos híbridos enchufables basados en pilas de combustibles FCHEV se conocen como vehículos con cero emisiones de CO₂ o libres de contaminación del aire (Ball and Weeda 2015) (Walker, Fowler, and Ahmadi 2015). La proporción de vehículos con celdas de combustible de hidrógeno FCHEV en la industria automotriz aumentará al obtener una liberación de emisiones inocuas en el consumo de energía global. A pesar de las ventajas anteriores en términos de eficiencia, la transición a la tecnología de vehículos de hidrógeno será en función a un cambio tecnológico sustancial, los obstáculos para su viabilidad son considerables (González, 2022).

Las técnicas de almacenamiento de hidrógeno disponibles también son determinantes (Ren, Ma, and Cong 2015) (Ball and Weeda 2015). Las tecnologías de almacenamiento requieren mejoras en la química, la densidad de energía eléctrica, la vida útil, la seguridad y el costo de las baterías (Jain 2009). La rápida difusión de las pilas de combustible en los FCHEV depende de una mejora significativa del rendimiento de la batería y de la reducción de los costes de producción.

El hidrógeno

El elemento más simple del universo, se compone de un protón y un electrón. El más ligero de todos los elementos y gases, es 14 veces más ligero que el aire. Capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh/kg, frente a los 13,9 kWh/kg del gas natural o los 12,4 kWh/kg del petróleo, lo que se traduce en una mayor eficiencia por peso que la de los combustibles que se emplean en la actualidad (Dutta 2014).

El hidrógeno es el combustible más limpio a partir del H₂ y aire O₂, se genera agua y energía eléctrica, calor o los dos. A diferencia de los combustibles basados en el carbono, el hidrógeno no produce subproductos nocivos con su combustión. Solo se genera energía y agua limpia cuando se combina con el oxígeno en una pila de combustible. Por las propiedades físicas del hidrógeno, almacenarlo supone todo un reto, sobre todo cuando se trata de hacerlo en un contenedor pequeño, ligero, seguro y barato, como tiene que ser un depósito de un vehículo. Puede parecer extraño, cuando se sabe que 1 kilo de hidrógeno genera la misma energía que casi 3 de gasolina (González, 2022). Como se compara en la tabla 1.

Figura 1: Comparativa del hidrógeno con otros combustibles

Hidrógeno	Gasolina	Diesel	Gas Natural*	Metano
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,54 – 3,14kg	2,40 kg
1 litro (líquido)	0,268 l	0,236 l	-----	-----
1 litro (gas) **	0,0965 l	0,0850 l	0,3 - 0,35 l	0,240 l

* dependiendo de la composición del GN ** todos los gases comprimidos a 350 bares

Sin embargo, ese kilo ocupa mucho volumen, por lo que la cantidad de energía que aporta el hidrógeno por unidad de volumen, su densidad energética es bajísima. Tan baja que, de utilizar hidrógeno sin tatar, los coches serían depósitos con ruedas, o se quedarían sin combustible casi antes de arrancar. Según (Wu et al. 2019) para almacenar 4 kg de hidrógeno, que es lo que consume un coche a pila de combustible en una distancia de 400 km, se necesitaría un depósito equivalente a un globo de más de 5m de diámetro. Naturalmente, la solución al problema para por reducir el volumen de hidrógeno como se reduce el volumen de todos los gases: comprimiéndolo ó enfriándolo hasta licuarlo. Técnicamente lo más sencillo es comprimir a una presión de 200 – 350 bares, en esas condiciones los 4 kg de hidrógeno siguen ocupando un espacio alrededor de 250 litros. El desarrollo de nuevos materiales compuestos de fibra de carbono con polímeros y aluminio, hoy en día está permitiendo almacenarlo a presiones de hasta 700 bares, envacando mayor cantidad con menos volumen (Rodríguez 2020). En estado líquido el hidrógeno y a -253°C ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

Métodos de producción del H₂

La producción de hidrógeno a partir de fuentes baratas y renovables es el factor clave para la utilización de energía H₂ en la vida real. Hay muchas fuentes para la producción de H₂, a saber, agua, glicerol, biomasa, etc (Miltner et al. 2010). La mayoría de los investigadores enfatizan la utilización del agua como fuente de H₂ debido a su disponibilidad.

Producción de H₂ a partir del agua

El hidrógeno se puede producir a partir del agua por diferentes métodos: división termoquímica, celda fotovoltaica y reacción fotoquímica. Los ciclos termoquímicos de división del agua TCWSC utilizan múltiples reacciones químicas, con el efecto neto de la disociación del agua para formar hidrógeno y oxígeno. Los TCWSC emplean una fuente de energía térmica de alta temperatura, como la energía nuclear o solar, para impulsar el ciclo. En el caso de los TCWSC solares, la energía solar a menudo se degrada a energía térmica antes de su uso en el ciclo, degradando así el componente cuántico de la luz solar (Miltner et al. 2010).

Producción de H₂ a partir de glicerol

Según (Dave and Pant 2011) el método de producción de hidrógeno a partir del reformado con vapor de glicerol sobre un catalizador a base de níquel promovido por zirconia y soportado sobre ceria. Las mezclas de bioglicerina y bioetanol se pueden utilizar como materia prima para producir H₂ mediante reformado catalítico con vapor. La comparación de las actividades de los catalizadores de Pt y Ni mostró que los catalizadores de Pt produjeron menores rendimientos de H₂. Esto puede ser atribuido a la menor carga de Pt en comparación con el contenido de metal de los catalizadores a base de Ni (Iriando et al. 2012).

Producción de H₂ a partir de biomasa

Un método interesante y prometedor de utilización de biomasa es la producción de hidrógeno por fermentación. La tecnología para la producción anaeróbica de hidrógeno a partir de biomasa residual está bien desarrollada. (Yang et al. 2011) demostró el potencial de los residuos de biomasa de microalgas extraídos de lípidos renovables LMBR como materia prima para la producción de hidrógeno. Los LMBR son la biomasa residual de los procesos de producción de

biodiésel rica en carbohidratos y proteínas. La recuperación de energía de los LMBR juega un papel importante en el desarrollo sostenible de la industria del biodiésel de microalgas. La tecnología de gasificación catalítica a baja temperatura LTCG empleada para convertir el estiércol de las aves en gas rico en H₂ será una ruta favorecida para la utilización eficiente y limpia de los desechos.(Zhang et al. 2011)

Producción de H₂ de otras fuentes

Las investigaciones muestran que la urea se puede utilizar como materia prima para la producción de hidrógeno y metano a partir de suero de queso en un proceso de dos etapas. (King and Botte 2011) demostró una tecnología para la producción de hidrógeno y otros productos valiosos, como el nitrógeno y agua limpia, mediante la oxidación electroquímica de la urea en medios alcalinos. Esta oxidación de urea a hidrógeno tiene beneficios significativos sobre los métodos estándar de producción de hidrógeno. El hidrógeno 100% puro se produce a baja temperatura, presión y consumo de energía junto con otros productos valiosos, como nitrógeno al 96,1% y agua limpia (Boggs, King, and Botte 2009). Se ha demostrado que el níquel económico es el catalizador más activo para la oxidación electroquímica de la orina humana en medios alcalinos.

Análisis del costo de producción del H₂

El coste del hidrógeno varía según la fuente de producción, que puede ser mediante combustibles fósiles y biomasa o mediante energías renovables a través de la electrólisis del agua. Actualmente, el gas natural es la principal fuente de producción del hidrógeno y representa en torno a tres cuartas partes de la producción global, cuyo valor aproximado es 70 millones de toneladas. Este valor representa aproximadamente un 6% del uso global del gas natural. Al gas natural le sigue el carbón, que tiene un papel importante en China y la cantidad restante de hidrógeno producido es a partir del uso de petróleo y electricidad (International Energy Agency 2019). En la siguiente ilustración se aprecia que el costo del hidrógeno procedente de varias fuentes por kilogramo de H₂, con una tendencia actual hacia el aumento de la producción del hidrógeno verde, es decir, el procedente de energías renovables.

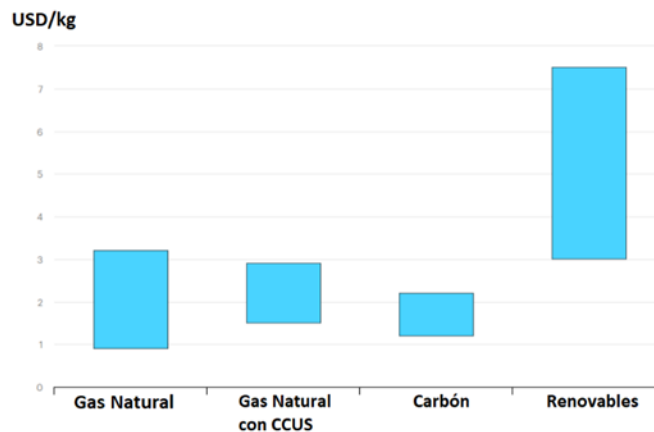


Figura 2: Resumen de costo del H₂ según su fuente de producción.

Aunque se estima que se reduzca en torno a un 30% el coste del hidrógeno procedente de energías renovables para el año 2030, como resultado de una disminución de los costes de las energías renovables y un aumento de la producción del hidrógeno (International Energy Agency, 2019). En las hidrogeneras europeas el precio del kilogramo está en el rango de 8 a 10 dólares.

Almacenamiento y seguridad

El almacenamiento es claramente el mayor desafío para el H₂, como combustible vehicular, en el desarrollo de la economía del hidrógeno (Gurz et al. 2017). Las barreras de implementación para un cambio tecnológico radical son muchas. Tener la densidad de energía más baja debido a la baja densidad del hidrógeno, que tiene la energía más alta por kilogramo, presenta algunas dificultades en el almacenamiento. Para resolver tal problema, se deben usar presiones muy altas en el almacenamiento. Esto también tiene mucho que ver con las características de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía disponibles, junto con el rendimiento de almacenamiento de los vehículos de hidrógeno como combustible. En general, podemos clasificar en dos categorías: almacenamiento como hidrógeno y almacenamiento mediante métodos químicos. El hidrógeno se almacena por compresión en forma de gas o en forma líquida junto con el almacenamiento mediante el uso de un hidruro metálico reversible y mediante el uso de una nanofibra de carbono (Jain 2009). Los métodos químicos en almacenamiento son metanol, hidruros de metales alcalinos, borohidruro de sodio y amoníaco.

Hidrógeno comprimido

La compresión de hidrógeno es el método más popular y común para el almacenamiento de H₂. Un beneficio significativo del almacenamiento de hidrógeno como gas a alta presión es la gran relación de liberación y llenado rápido. Aunque esta tecnología es simple, los problemas de seguridad y la necesidad de grandes espacios son sus principales desventajas. Para almacenar hidrógeno gaseoso existen cinco categorías de recipientes a presión las cuales se presentan en la siguiente tabla (Abohamzeh et al. 2021).

Figura 3: Diferentes tipos de recipientes a presión para almacenamiento de hidrógeno.

Tipos de recipientes a presión	Peso	Costo	Presión [bar]
Tipo I: Recipientes a presión totalmente metálicos.	Más pesado	Costo más bajo	Hasta 200
Tipo II: Recipiente de acero con una capa compuesta de fibra de vidrio añadida alrededor del acero.	30-40 % más ligero que el tipo I	50 % más el costo que el tipo I	300
Tipo III: Recipientes totalmente envueltos con revestimiento compuesto y metálico.	70 % más ligero que el tipo I	Aproximadamente el doble del costo que el tipo II	350-700
Tipo IV: Compuesto completo.	80 % más ligero que el tipo I	Mayor costo que el tipo I	Hasta los 1000
Tipo V: Recipiente a presión totalmente compuesto sin revestimiento.	85 % más ligero que el tipo I	-----	-----

Hidrógeno líquido (LH₂)

Es posible almacenar H₂ en estado líquido, que no es corrosivo e incoloro. Los tanques de H₂ licuado pueden almacenar 0,07 kg por litro, que es superior a los tanques de hidrógeno comprimido que almacenan 0,03 kg por litro. La licuefacción del hidrógeno se lleva a cabo a una temperatura extremadamente baja -253 °C, y el desafío más crítico del almacenamiento

criogénico de H₂ es mantener el hidrógeno a una temperatura tan baja. La licuación del hidrógeno es un proceso caro y lento. La pérdida de energía durante este proceso es de alrededor del 40 %, mientras que la pérdida de energía en el almacenamiento de H₂ comprimido es de aproximadamente el 10 % (Abohamzeh et al. 2021). Además, una proporción del hidrógeno líquido almacenado se pierde al día alrededor del 0,2 % en los recipientes grandes y del 2 al 3 % en los más pequeños al día, lo que se debe a la evaporación.

Seguridad

Dado que el hidrógeno es un gas inflamable, explosivo y más liviano que el aire, el almacenamiento de hidrógeno, el suministro y el sistema de seguridad están directamente relacionados entre sí. La energía mínima de ignición del hidrógeno es de 0,017 MJ, es más sensible al fuego. Sin embargo, el hidrógeno se esparce muy rápidamente porque es el gas más liviano y tiene menos peligrosidad que la gasolina (Gurz et al. 2017). La detonación de hidrógeno puede ocurrir a una relación de concentración volumétrica de hidrógeno a aire tan bajo como 4% y tan alto como 75%. Por otro lado, el hidrógeno tiene una alta permeabilidad a través de muchos materiales.

Políticas internacionales

Desde principios del siglo XXI, un número cada vez mayor de países y regiones han considerado los desafíos de la contaminación del aire y la escasez de energía del transporte por carretera como cuestiones estratégicas. Para hacer frente a estos problemas, varios países han puesto en marcha políticas respaldadas por la legislación adecuada. Por ejemplo, dentro de la Unión Europea UE, el requisito normativo actual para la emisión media de Gases Efecto Invernadero GEI de la flota de todos los vehículos nuevos es de 95 g de CO₂ por kilómetro para 2021, lo que supone una disminución de más del 40 % en comparación con el objetivo de 2007 (Dornoff et al. 2018) (Deloitte China 2020). Además, algunos países con tecnología y mercados líderes en tecnología automotriz ya han introducido políticas que se comprometen a eliminar los ICE de la flota de vehículos, como se puede ver de manera resumida en la tabla 3.

Figura 4: Prohibición planificada de vehículos ICE puros

País	Año para prohibir los ICE puros
Alemania	2040 (Provisional)
Francia	2040
Reino Unido	2040
España	2040
India	2030
Canada	2040
Holanda	2025

Como ocurre con la mayoría de las innovaciones tecnológicas, la fase inicial del desarrollo y despliegue de la tecnología de celdas de combustible suelen depender de las políticas e incentivos gubernamentales. Se han creado planes estratégicos en países como China, Japón, Estados Unidos y en general por toda Europa, en los que se invierte en investigación y desarrollo de las pilas de combustible, estableciendo políticas de subsidio y planes estratégicos a medio y a largo plazo (Deloitte China 2020). A continuación, se muestra la tabla 4 a modo de resumen del enfoque político que ha tomado cada país y Europa.

Figura 5: Resumen general de las políticas de los principales mercados H2

Estados Unidos	China	Europa	Japón
Estrategia Nacional			
En 1990 el gobierno estadounidense publicó "Hydrogen Research, Development And Demonstration Act", donde exponía un plan para la investigación y desarrollo del hidrógeno como energía de 5 años.	Aunque relativamente tarde en comparación con otros países, China está poniendo especial atención en el hidrógeno. En el plan de estrategia de innovación tecnológica de 2016,	En 2003, como conjunto los países de la Unión Europea lanzaron el "European Research Area", proyecto que incluía la construcción de una plataforma para investigación y desarrollo de las pilas de combustible.	El hidrógeno se estableció como "energía nacional" de Japón. En 2014, Japón lanzó el cuarto Plan de Energía Estratégico y publicó una hoja de ruta del hidrógeno y de las pilas de combustible. En el

<p>Ha formado un conjunto de leyes, políticas y planes de investigación para incentivar el uso de hidrógeno como energía.</p>	<p>el hidrógeno fue nombrado como uno de las 15 áreas clave. En 2019, durante “Two Sessions” el hidrógeno fue escrito en el informe de trabajo del gobierno por primera vez.</p>	<p>que mostraba una aproximación de lo que sería la producción, el transporte y el almacenamiento del hidrógeno.</p> <p>En 2019, “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” lanzó la hoja de ruta del hidrógeno en Europa, que proponía un plan para el desarrollo del hidrógeno hacia 2030 y 2050.</p>
---	--	--

Producción y distribución de hidrógeno

<p>En 2019 el Departamento de Energía (DOE) lanzó una oportunidad de financiación de hasta 31 millones de dólares. Para avanzar en la producción, almacenamiento y llenado del hidrógeno.</p>	<p>Tiene una barrera política debido a la consideración del hidrógeno como material peligroso.</p>	<p>Avance en la producción de hidrógeno limpio. Cambio en la producción de 1/3 del hidrógeno total en hidrógeno limpio para 2030.</p>	<p>Construcción de un sistema eficiente de distribución de hidrógeno para zonas domésticas. Para 2040, fabricar, transportar y almacenar únicamente hidrógeno limpio.</p>
---	--	---	---

Infraestructura

<p>DOE lanzó una asociación con productores de vehículos eléctricos basados en pilas de combustible para avanzar con la infraestructura del</p>	<p>Procedimientos para aprobar estaciones de hidrógeno no están claros a día de hoy.</p>	<p>En 2009, Alemania estableció “H2 Mobility” donde invertía en la primera red de hidrogeneras a nivel mundial. En la hoja de ruta de</p>	<p>Entre 2016 y 2018, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria ha invertido 88 millones de dólares en investigación y desarrollo y 539</p>
---	--	---	---

<p>hidrógeno.</p> <p>“California Fuel Cell Partnership” tiene como objetivo 1000 hidrogeneras para 2030.</p>	<p>hidrógeno europea se estima la instalación de 3700 hidrogeneras para 2030.</p>	<p>millones de dólares en la construcción de hidrogeneras.</p>
--	---	--

Vehículos comerciales y de pasajeros

<p>El gobierno estadounidense aclaró el papel fundamental del hidrógeno en el transporte en el “Energy Strategy” en 2014</p> <p>“California Fuel Cell Partnership” marcó el objetivo de conseguir un millón de vehículos propulsados con pilas de combustible para 2030.</p>	<p>Existencia de subvenciones para vehículos de pilas de combustible que durarán hasta 2025.</p> <p>El gobierno se centra en aplicaciones comerciales de los vehículos de pilas de combustible al igual que con los vehículos eléctricos.</p>	<p>Según la hoja de ruta se estiman 3,7 millones de vehículos particulares propulsados con pilas de combustible para 2030.</p> <p>Al igual que se estiman 500.000 vehículos comerciales ligeros y 45.000 camiones y autobuses para ese mismo año.</p>	<p>Los vehículos son en su mayoría de particulares. Lanzaron el Toyota Mirai en 2014.</p> <p>Tienen como objetivo la fabricación de 800.000 vehículos de pilas de combustible para 2030.</p> <p>También planean tener 1.200 autobuses y 10.000 montacargas con esta tecnología para 2030.</p>
--	---	---	---

Estados Unidos es el primer país en establecer la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible como parte de su estrategia energética nacional. Iniciado debido a la crisis del petróleo, el gobierno de los Estados Unidos ha financiado el patrocinio de investigaciones sobre el hidrógeno desde la década de 1970 (Deloitte China 2020). California representa el nivel más alto de comercialización de vehículos con celdas de combustible de hidrógeno en los Estados

Unidos, debido a un nivel de apoyo gubernamental y público para las energías renovables que no se encuentra en otros estados. De cara al futuro, California Fuel Cell Partnership ha definido objetivos para 1000 estaciones de servicio de hidrógeno y 1000000 de FCEV para 2030 (Air Resources Board 2019).

Combustión del hidrógeno

El hidrógeno, un gas inflamable, tiene el potencial de ser utilizado en vehículos de combustión interna, ya que tiene una emisión inocua para el medio ambiente mientras se quema (Fayaz et al. 2012). El principio de funcionamiento de los H2ICE se basa en la naturaleza inflamable del hidrógeno. La eficiencia de los vehículos ICE que utilizan hidrógeno directo es menor que la de sus equivalentes ICE de gasolina (Gurz et al. 2017). La eficiencia energética del ICE que utiliza hidrógeno premezclado en el múltiple de admisión también es menor que el mismo motor alimentado con gasolina o diésel en lugar de hidrógeno (White, Steeper, and Lutz 2006). A continuación, se puede apreciar una representación esquemática de H2ICE potenciado por presión.

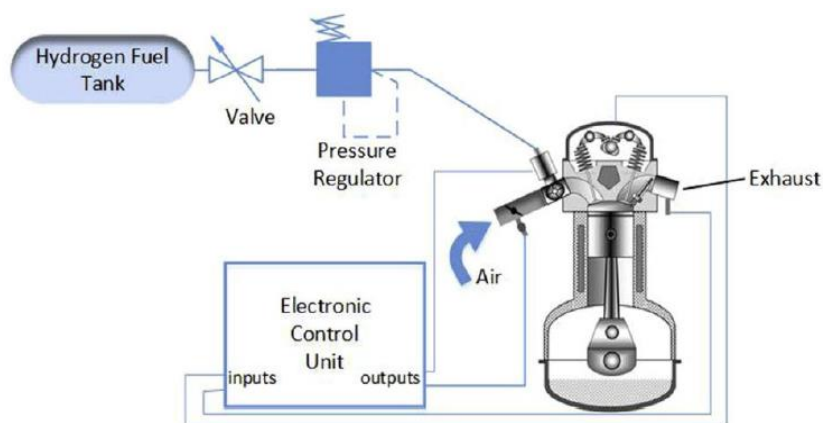


Figura 6: Representación esquemática de un motor de combustión con H2

Se investigan numerosos estudios, que examinan diferentes aspectos, para mejorar la eficiencia energética de los motores de hidrógeno (Gurz et al. 2017), entre ellos también está el ICE alimentado con hidrógeno líquido de inyección directa. Estos esfuerzos han sido bastante beneficiosos para el futuro de los ICE alimentados con hidrógeno.

Modificaciones en el motor ICE tradicional al usar H₂

Según (Gurz et al. 2017) a alta temperatura de autoencendido del hidrógeno, el aumento de presión en la cámara de combustión y el largo retraso del encendido automático pueden considerarse como factores para realizar diversas modificaciones, entre ellas se pueden rescatar las siguientes:

- Las bujías deben ser de tipo frías para un enfriamiento rápido, las mismas no pueden ser de punta de platino ya que es un catalizador lo cual fomenta la ignición prematura. Las bujías deben ser de un alambre fino de diámetro de 0,0381 [cm], por recomendación y no mayor a 0,0635 [cm] (González 2022).
- Grados a los que aplica la chispa en gasolina es de 8 a 9° antes del PMS sin embrago con el hidrógeno debe ser justo en el PMS (Gurz et al. 2017).
- Se debe tener cuidado especialmente en las válvulas donde se recomienda cambiarlas por válvulas que tengan una dureza de alrededor de 50 y 60 Rockwell y de aleación stellite (cobalto-cromo) lo que permite un mejor comportamiento frente a desgaste y fallos.
- El sistema de escape del auto debe ser de acero inoxidable ya que se estima que por cada 1 Kg de hidrógeno se genere 4 litros de agua de esta manera se eliminan los problemas por oxidación (Rodríguez 2020).
- Para evitar que el aceite entre a la cámara de combustión, se puede hacer realizando un revestimiento del sellado de las válvulas esto con un revestimiento de diamante.
- El motor debe funcionar con aceite sintético para evitar pirolisis, puntos calientes y pre-ignición.

Celda de combustible

Es un reactor electroquímico que convierte la energía química de un combustible y un oxidante directamente a electricidad. El hidrógeno tiene una larga historia de uso como combustible para la movilidad. Hace más de 200 años, el hidrógeno se utilizó en los primeros motores de combustión interna quemando el propio hidrógeno, similar a quemar gasolina hoy (Deloitte China 2020) (Rodríguez 2020) Sin embargo, esto no resultó ser del todo exitoso, debido a preocupaciones de seguridad, así como a la baja densidad de energía. Más bien, en una celda de combustible moderna, el hidrógeno es un portador de energía, al reaccionar con el oxígeno para

formar electricidad. La reacción entre el hidrógeno y el oxígeno es asombrosamente simple y se puede representar mediante la siguiente fórmula (Deloitte China 2020):



En una celda de combustible, el hidrógeno y el oxígeno se introducen por separado con hidrógeno suministrado a un electrodo de la celda de combustible y oxígeno al otro, como se aprecia en la siguiente figura (Deloitte China 2020).

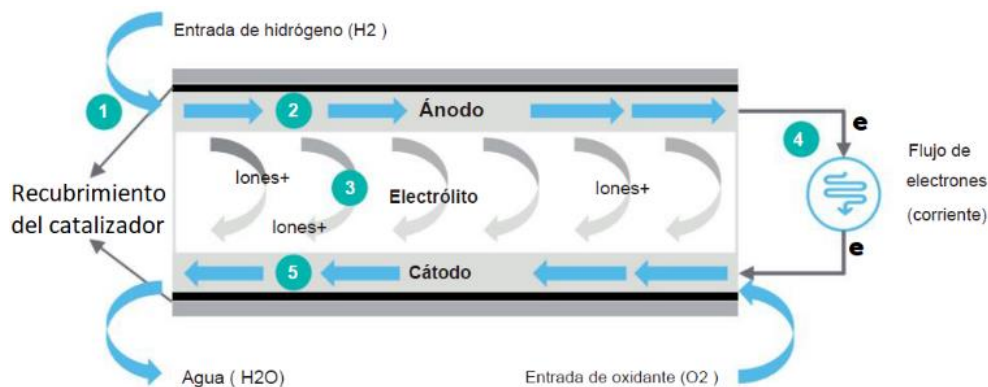


Figura 7: Principio de funcionamiento de la celda de combustible.

Los dos electrodos están separados por un material llamado electrolito, que actúa como un filtro para evitar que los reactivos de la celda se mezclen directamente entre sí. Las moléculas de hidrógeno ingresan en primera instancia al electrodo de hidrógeno llamado ánodo de la celda de combustible (paso 1). Luego, las moléculas de hidrógeno reaccionan con el catalizador que recubre el ánodo, liberando electrones para formar un ion de hidrógeno con carga positiva (paso 2). Estos iones atraviesan el electrolito y alcanzan el oxígeno en el segundo electrodo (llamado cátodo) (paso 3). Los electrones, sin embargo, no pueden pasar el electrolito. En su lugar, fluyen hacia un circuito eléctrico, generando la energía del sistema de celdas de combustible (paso 4). En el cátodo, el catalizador hace que los iones de hidrógeno y los electrones se unan con el oxígeno del aire para formar vapor de agua, que es el único subproducto del proceso (paso 5) (Deloitte China 2020).

Principio de funcionamiento del vehículo de celda de combustible

En un vehículo de celda de combustible de hidrógeno, el sistema se compone de un conjunto de celdas de combustible y sistemas auxiliares. Como se puede apreciar en la figura 2, las celdas de combustible es el componente central, que convierte la energía química en energía eléctrica para alimentar el automóvil (Deloitte China 2020).

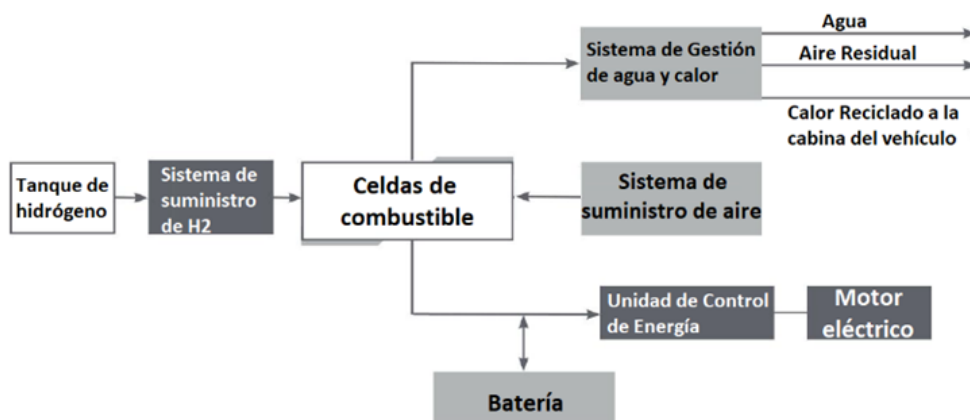


Figura 8: Principio de funcionamiento del vehículo de celda de combustible.

Además de las celdas de combustible, hay cuatro sistemas auxiliares que son: sistema de suministro de hidrógeno, sistema de suministro de aire, sistema de suministro de agua y el sistema de gestión del calor. La electricidad producida por el sistema de pila de combustible pasa a través de una unidad de control de potencia PCU al motor eléctrico, con la ayuda de una batería para proporcionar energía adicional cuando sea necesario.

Sistemas de propulsión de FCEV, BEV e ICE

El sistema de propulsión de un vehículo está compuesto por todos los componentes que generan la energía necesaria para el movimiento del vehículo y la transfieren a la carretera. Todos estos componentes tienen que conectarse de manera segura para garantizar el funcionamiento eficiente del vehículo. En los vehículos basados en pilas de combustible FCEV la tecnología está ligada a un motor eléctrico, de esta forma se eliminan varios componentes propios de los motores de combustión ICE y de sus subsistemas adicionales (Deloitte China 2020). Como pueden ser las correas de distribución, válvulas, pistones, cigüeñales, tubos de escape, caja de cambios o sistemas de lubricación. De esta manera se simplifica el diseño, disminuye el coste del

mantenimiento y mejora la durabilidad del vehículo. Como se aprecia en la figura 3, la principal diferencia entre el FCEV y otros vehículos es el sistema de propulsión, todos los componentes son esencialmente similares.

Los FCEV y BEV transfieren la energía eléctrica a energía cinética a través de un motor eléctrico, mientras que los vehículos a gasolina y diesel transfieren energía térmica del combustible quemado a energía cinética (Gurz et al. 2017) La principal diferencia entre FCEV y BEV es la fuente de electricidad, los BEV utilizan toda su energía de un paquete de baterías que se recarga externamente en las estaciones de carga.

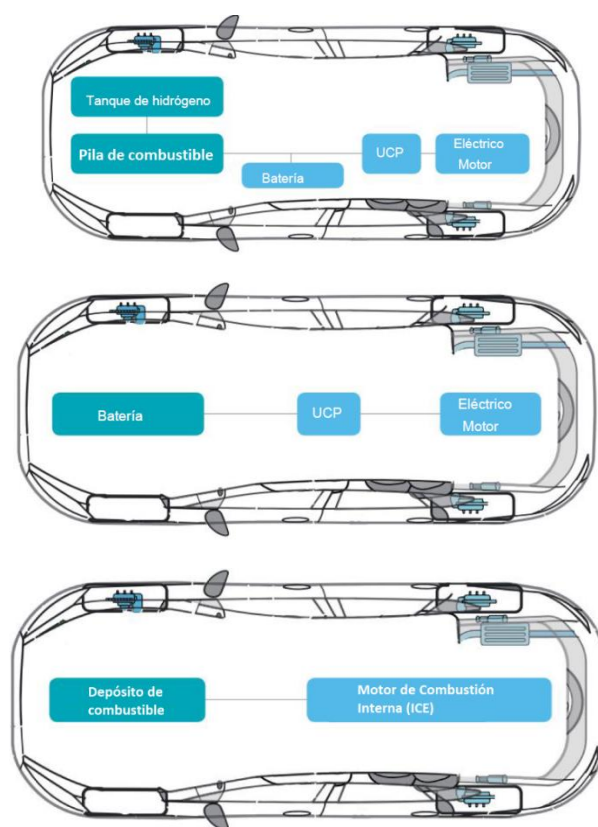


Figura 9: Componentes de los sistemas de propulsión de FCEV, BEV e ICE.

Vehículos comercializados

En la actualidad son varios los fabricantes de vehículos que llevan años apostando fuerte por la pila de combustible, una de ellas y que está entre las más comercializadas es el Hyundai Nexso así como Toyota lleva desde 2002 trabajando en este tipo de tecnologías hasta la materialización del Mirai.

Toyota Mirai

El Toyota Mirai es un coche eléctrico que emplea el hidrógeno como fuente de energía. El hidrógeno se quema para generar energía que se almacena en la batería y que posteriormente se encarga de alimentar al motor eléctrico. Analizando por partes, el motor eléctrico genera una potencia de salida de 182 caballos y 300 Nm de par motor. La batería de iones de litio va ubicada en la parte trasera y dispone de 1,24 kWh de capacidad. El hidrógeno se acumula en tres depósitos repartidos por la parte inferior del coche. Tienen una capacidad de 5,6 kilogramos (Toyota 2021).



Figura 10: Componentes de los sistemas de propulsión de FCEV, BEV e ICE.

Una vez llenados el peso total de los depósitos es de 100 kilogramos. La ventaja principal de los coches de célula de hidrógeno es la sencillez y la rapidez de recarga. La autonomía estimada del Toyota Mirai es de 650 kilómetros, aunque es un dato pendiente de homologación.

Hyundai Nexa

El Hyundai NEXO con pila de combustible proporciona una eficiencia de pila de combustible y una autonomía de 666 km. Su arquitectura proporciona una mejor relación peso/potencia, una aceleración más rápida y más espacio en la cabina. El bloque eléctrico cuenta con una potencia de 120 kW (163 CV) y rinde un par máximo de 395 Nm. Ese motor eléctrico está alimentado por una batería con una capacidad de 40 kWh, ubicada bajo el suelo del maletero. A diferencia de un coche eléctrico convencional esta batería no se recarga de una red eléctrica, si no mediante el trabajo de la pila de combustible, cuenta con tres depósitos de hidrógeno de 52,2 litros cada uno.

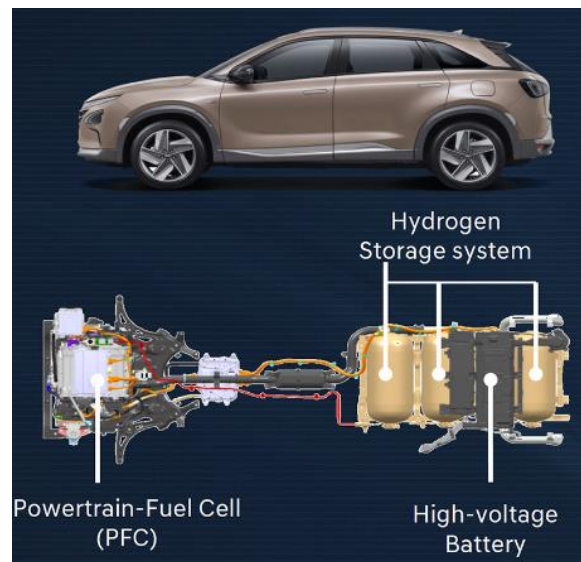


Figura 11: Especificación de principales componentes Hyundai Nexo

En total son 156,6 litros repartidos bajo los asientos de la segunda fila y el piso del maletero. En conjunto, la autonomía homologada en ciclo estándar global para determinar los niveles de contaminantes, emisiones de CO₂ y consumo de combustible de los coches WLTP lo lleva hasta los 660 kilómetros. Con todo, las prestaciones del Nexo son muy competentes. Acelera de 0 a 100 kilómetros por hora en 9,2 segundos. La velocidad máxima, limitada de forma electrónica para ahorrar energía, es de 179 kilómetros por hora (Hyundai 2019).

Referencias

1. Abohamzeh, Elham, Fatemeh Salehi, Mohsen Sheikholeslami, Rouzbeh Abbassi, and Faisal Khan. 2021. "Review of Hydrogen Safety during Storage, Transmission, and Applications Processes." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 72. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104569.
2. Air Resources Board, California. 2019. 2019 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle & Hydrogen Fuel Network Development.
3. Ball, Michael, and Marcel Weeda. 2015. "The Hydrogen Economy - Vision or Reality?" *International Journal of Hydrogen Energy* 40(25):7903–19. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.032.

4. Boggs, Bryan K., Rebecca L. King, and Gerardine G. Botte. 2009. "Urea Electrolysis: Direct Hydrogen Production from Urine." *Chemical Communications* (32):4859–61. doi: 10.1039/b905974a.
5. Dave, Chirag D., and K. K. Pant. 2011. "Renewable Hydrogen Generation by Steam Reforming of Glycerol over Zirconia Promoted Ceria Supported Catalyst." *Renewable Energy* 36(11):3195–3202. doi: 10.1016/j.renene.2011.03.013.
6. Deloitte China. 2020. *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and Fuel Cell Solutions for Transportation Volume 1*.
7. Dornoff, Jan, Joshua Miller, Peter Mock, and Uwe Tietge. 2018. *The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO₂ Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation BACKGROUND*.
8. Dutta, Suman. 2014. "A Review on Production, Storage of Hydrogen and Its Utilization as an Energy Resource." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(4):1148–56.
9. Fayaz, H., R. Saidur, N. Razali, F. S. Anuar, A. R. Saleman, and M. R. Islam. 2012. "An Overview of Hydrogen as a Vehicle Fuel." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):5511–28.
10. González, Rogelio. 2022. *Hidrógeno Pila de Combustible: Gases Del Aire*. Diaz de Santos.
11. Gurz, Mehmet, Ertugrul Baltacioglu, Yakup Hames, and Kemal Kaya. 2017. "The Meeting of Hydrogen and Automotive: A Review." Pp. 23334–46 in *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 42. Elsevier Ltd.
12. Hyundai. 2019. "Hyundai Motor Group Homepage." Retrieved July 16, 2022 (<https://www.hyundaimotorgroup.com/Index.hub>).
13. International Energy Agency. 2019. *The Future of Hydrogen: Report Prepared by the IEA for the G20, Japan*.
14. Iriondo, A., V. L. Barrio, M. el Doukkali, J. F. Cambra, M. B. Güemez, J. Requies, P. L. Arias, M. C. Sánchez-Sánchez, R. Navarro, and J. L. G. Fierro. 2012. "Biohydrogen Production by Gas Phase Reforming of Glycerine and Ethanol Mixtures." Pp. 2028–36 in *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37.
15. Jain, I. P. 2009. "Hydrogen the Fuel for 21st Century." *International Journal of Hydrogen Energy* 34(17):7368–78. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.093.

16. King, Rebecca L., and Gerardine G. Botte. 2011. "Hydrogen Production via Urea Electrolysis Using a Gel Electrolyte." *Journal of Power Sources* 196(5):2773–78. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.006.
17. Miltner, Angela, Walter Wukovits, Tobias Pröll, and Anton Friedl. 2010. "Renewable Hydrogen Production: A Technical Evaluation Based on Process Simulation." *Journal of Cleaner Production* 18(SUPPL. 1). doi: 10.1016/j.jclepro.2010.05.024.
18. Ren, Guizhou, Guoqing Ma, and Ning Cong. 2015. "Review of Electrical Energy Storage System for Vehicular Applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:225–36.
19. Rodríguez, Rafael. 2020. "Análisis de Sistemas de Propulsión Para Automoción Basados En Pilas de Combustible y Estimación de Costes." Universidad de Sevilla, Sevilla.
20. Toyota. 2021. "Outline of the Mirai Key Specifications." Toyota Mot. Corp. Retrieved July 16, 2022 (<http://newsroom.toyota.co.jp/en/download/4224903>).
21. Walker, Sean B., Michael. Fowler, and Leila. Ahmadi. 2015. "Comparative Life Cycle Assessment of Power-to-Gas Generation of Hydrogen with a Dynamic Emissions Factor for Fuel Cell Vehicles." *Journal of Energy Storage* 4:62–73. doi: 10.1016/j.est.2015.09.006.
22. White, C. M., R. R. Steeper, and A. E. Lutz. 2006. "The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Technical Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 31(10):1292–1305. doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.12.001.
23. Wu, Dongxiao, Jin Ren, Huw Davies, Jinlei Shang, and Olivier Haas. 2019. "Intelligent Hydrogen Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles." *World Electric Vehicle Journal* 10(2).
24. Yang, Zhiman, Rongbo Guo, Xiaohui Xu, Xiaolei Fan, and Shengjun Luo. 2011. "Fermentative Hydrogen Production from Lipid-Extracted Microalgal Biomass Residues." *Applied Energy* 88(10):3468–72. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.009.
25. Zhang, Shou Yu, Jian Wang, Jing Pei Cao, and Takayuki Takarada. 2011. "H₂ Production from Fowl Manure by Low Temperature Catalytic Gasification." *Bioresource Technology* 102(16):7561–66. doi: 10.1016/j.biortech.2011.05.037.

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).