



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Actualidad del uso de hidrógeno
en autotransporte**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

César Enrique Loreto Romero

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Francisco González Pineda



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

*Dedicado a mi padre, a mi madre,
mis hermanos, mi familia y amigos.*

Agradecimientos

A mis padres a quien les debo lo que soy, por darme siempre su apoyo incondicional para cumplir mis sueños, por estar en los buenos y malos momentos, por apoyarme y brindarme todas las herramientas necesarias para seguir aprendiendo y mejorando en todos los aspectos, por los valores con los que me educaron que me han llevado a ser la persona que soy. Por inculcarme la importancia de que con esfuerzo y dedicación se pueden lograr muchas cosas, por todo el sacrificio que tuvieron que hacer para que pudiera estudiar y llegar hasta donde hoy estoy, y sin duda por toda la confianza depositada en mí sabiendo que podría lograrlo. Por eso y más, gracias.

A mis hermanos que siempre han sido los mejores compañeros de vida, por los momentos inolvidables que hemos vivido, por el apoyo que siempre me han brindado, por ser parte esencial para no rendirme y poder demostrarles con el ejemplo que no hay imposibles, que todo llega con esfuerzo y dedicación.

A mis abuelos, tíos y primos por brindarme su apoyo incondicional, alentándome a perseguir mis sueños, por sus acertados consejos y sobre todo gracias por depositar su confianza en mí.

A mis compañeros y amigos que estuvieron en esta etapa de mi vida por los buenos y malos momentos que pasamos, por las experiencias vividas, por el apoyo brindado, sin duda fueron una parte fundamental para poder cumplir esta meta.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), de la UNAM, por el apoyo brindado a través del Programa de Apoyo a Proyectos de investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), en el proyecto AG100222 titulado “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30’s y 40’s, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto invernadero”.

A mi amada Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), especialmente a la Facultad de Ingeniería (FI), le estoy eternamente agradecido por brindarme la invaluable oportunidad de formar parte de esta institución, completar mis estudios profesionales y vivir momentos memorables. “Por mi raza hablará el espíritu”

*“La vida de cada persona es un camino hacia sí mismo,
el ensayo de un camino, el boceto de un sendero”*

-Hermann Hesse

ÍNDICE

Resumen	10
Abstract	10
Objetivo	10
Metodología	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes	14
1.2. Planteamiento del problema	15
2. EL HIDRÓGENO	17
2.1. Historia del hidrógeno	18
2.2. Características y propiedades	19
2.3. Producción de hidrógeno	24
2.3.1. Electrólisis	25
2.3.2. Termólisis	27
2.3.3. Gasificación y reformado	28
2.3.4. Fotólisis	29
2.4. Almacenamiento	32
2.4.1. Hidrógeno comprimido	33
2.4.2. Hidrógeno líquido	35
2.4.3. Hidrógeno sólido	36
2.5. Distribución	39
2.5.1. Hidrógeno gaseoso a alta presión	40
2.5.2. Hidrógeno líquido	41
2.5.3. Hidrogeneras	43
3. EL HIDRÓGENO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	47
3.1. Historia	48
3.2. Motores de combustión interna	51
3.3. Sistemas de inyección	56
3.3.1. Motores de ignición por compresión	56
3.3.2. Motores de ignición por chispa	58
3.3.3. Inyectores	61
3.4. Sistemas de enfriamiento	62

3.4.1. Transferencia de calor	63
3.5. Discusión y análisis.....	64
3.6. Situación actual en el mercado.....	66
4. EL HIDRÓGENO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE	68
4.1. Historia de las celdas de combustible	71
4.2. Tipos de celdas de combustible	74
4.2.1. PEMFC.....	75
4.2.2. AFC.....	77
4.2.3. PAFC.....	79
4.2.4. MCFC.....	81
4.2.5. SOFC.....	83
4.2.6. DMFC	85
4.3. Curva de polarización.....	86
4.4. Movilidad eléctrica.....	92
4.4.1. BEV (Battery Electric Vehicle).....	95
4.4.2. PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle).....	95
4.4.3. FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)	95
4.4.4. PFCEV (Plug-in Fuel Cell Electric Vehicle)	96
4.5. Vehículos de celda de combustible en el mercado	98
5. CONCLUSIONES	102
6. REFERENCIAS	104
7. BIBLIOGRAFÍA	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Densidad de hidrógeno a presión constante e incrementos de temperatura	23
Figura 2 Electrólisis del agua	26
Figura 3 Proceso de gasificación.....	29
Figura 4 Los colores del hidrogeno.....	32
Figura 5 Tipos de tanques de presión.....	34
Figura 6 Microesferas de vidrio	35
Figura 7 Taque de almacenamiento de hidrógeno tipo Dewar.....	36
Figura 8 Tube tráiler para transporte de hidrógeno.....	41
Figura 9 Costes de transporte de hidrógeno en función de la distancia y volumen (\$/kg).....	42
Figura 10 Esquema de hidrogenera propuesta por Linde.....	43
Figura 11 Primera hidrogenera para suministro de hidrógeno a 700 bar en España.....	45
Figura 12 Estaciones de hidrógeno en operación en el mundo	46
Figura 13 Primer automóvil de combustión interna de hidrógeno	48
Figura 14 Motor y vehículo ideado por Lenoir.....	49
Figura 15 Camión de Norsk Hydro convertido para funcionar con hidrógeno	50
Figura 16 Ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos	54
Figura 17 Tipos de inyección en motores diésel	57
Figura 18 Tipos de inyección según el lugar donde se produce la inyección	60
Figura 19 Inyección según la cantidad de inyectores.....	60
Figura 20 Toyota Corolla Sport de hidrógeno	66
Figura 21 Esquema de una celda de combustible genérica.....	69
Figura 22 Componentes internos de una celda de combustible	70
Figura 23 Configuración del dispositivo de Grove	71
Figura 24 Científicos de la NASA trabajando en uno de los stacks de la nave Apollo 1964	73
Figura 25 Configuración básica de una pila (a) planar y (b) tubular	74
Figura 26 Celda de combustible PEM	75
Figura 27 Celda de combustible tipo AFC.....	78
Figura 28 Celda de combustible PAFC.....	79
Figura 29 Esquema de una celda de combustible de carbonatos fundidos	81
Figura 30 Curva de polarización de una celda de combustible de membrana polimérica	87
Figura 31 Variaciones en las curvas de polarización de una celda de combustible.....	89
Figura 32 Número de celdas vs área de la celda	91
Figura 33 Tren motriz simplificado de un PFCEV	97
Figura 34 Toyota Mirai de segunda generación.....	99
Figura 35 Hyundai NEXO	99
Figura 36 Honda Clarity Fuel Cell.....	100
Figura 37 Mercedes-Benz GLC Fuel Cell.....	101
Figura 38 Nikola Tre Fuel Cell	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del hidrógeno	20
Tabla 2 Propiedades de seguridad del hidrógeno	21
Tabla 3 Densidades energéticas del hidrógeno	22
Tabla 4 Ventajas y desventajas del uso de hidrógeno como combustible	24
Tabla 5 Características principales de las celdas de combustible	86

NOMENCLATURA

Siglas	Descripción
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
CH₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
EREV	<i>Extended Range Electric Vehicle</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
GM	General Motors
H	Hidrógeno elemento
H₂	Hidrógeno molécula
H₂O	Formula química del agua
H₃PO₄	Ácido Fosfórico
He	Helio
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
KOH	Hidróxido de Potasio
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
MEA	<i>Membrane Electrode Assembly</i>
NH₃	Amoniaco
Ni	Níquel
NiO	Óxido de Níquel
NO_x	Óxidos de Nitrógeno
O₂	Oxígeno molécula
OH	Hidróxido
PAF	<i>Phosphoric Acid Fuel</i>
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PEM	<i>Polymer Electrolyte Membrane</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PFCEV	<i>Plug-in Fuel Cell Electric Vehicle</i>

PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PMI	Punto Muerto Inferior
PMS	Punto Muerto Superior
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i>
TWSC	<i>Thermochemical Water Splitting Cycles</i>
UNICE	Unidad de Investigación y Control de Emisiones
Y₂O₃	Óxido de Itrio
ZrO₂	Dióxido de Circonio

Resumen

El cambio climático nos ha impulsado a buscar alternativas energéticas sostenibles en el sector del transporte, y el hidrógeno ha surgido como una solución prometedora. Este combustible limpio se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde motores de combustión interna hasta vehículos eléctricos con celdas de combustible, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Los vehículos eléctricos con celda de combustible destacan claramente sobre sus contrapartes de combustión, ya que en el mercado actual ya encontramos varios modelos disponibles de vehículos con esta tecnología, mientras que los vehículos de combustión basados en hidrógeno todavía se encuentran en etapas experimentales, siendo utilizados principalmente en pruebas y competencias como las 24 horas de Fuji en Japón.

Abstract

Climate change has driven us to seek sustainable energy alternatives in the transportation sector, and hydrogen has emerged as a promising solution. This clean fuel is used in a wide range of applications, from internal combustion engines to fuel cell electric vehicles, reducing greenhouse gas emissions and other pollutants. Fuel cell electric vehicles clearly stand out from their combustion counterparts, as there are already several models available on the market with this technology, whereas hydrogen-based combustion vehicles are still in experimental stages, primarily used in tests and competitions such as the 24 Hours of Fuji in Japan.

Objetivo

Analizar el uso del hidrógeno como fuente de energía en automoción en la actualidad y sea un apoyo para investigaciones experimentales futuras, tanto nacionales como internacionales, en especial las desarrolladas dentro de la Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE) de la UNAM.

Metodología

1. La metodología para este trabajo de investigación consiste en realizar una revisión bibliográfica que abarque los temas de hidrógeno como fuente de energía tanto para vehículos con motor de combustión interna y vehículos eléctricos, con el objeto de analizar las ventajas, desventajas y perspectivas de su aplicación en el sector de autotransporte.
2. Se llevará a cabo una búsqueda sistemática de artículos científicos, informes técnicos, publicaciones gubernamentales y estudios relevantes en bases de datos académicas y plataformas especializadas donde se utilizarán palabras clave como "hidrógeno como combustible", "celdas de combustible de hidrógeno", "vehículos de hidrógeno", "eficiencia energética del hidrógeno", entre otros, para identificar las fuentes más pertinentes, con la finalidad de recabar la mayor cantidad de información posible publicada durante los últimos años.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la crisis ambiental y la búsqueda constante de alternativas energéticas más limpias y sostenibles ha impulsado la exploración de diversas fuentes de energía para revolucionar el sector del transporte. Entre estas opciones, el hidrógeno ha surgido como un candidato a ser utilizado como fuente de energía tanto para motores de combustión interna como para vehículos eléctricos. Esta revolucionaria perspectiva se basa en la versatilidad del hidrógeno para abordar los desafíos energéticos y ambientales simultáneamente. A medida que el mundo avanza hacia la descarbonización y la eficiencia energética, explorar la viabilidad técnica, económica y ambiental del hidrógeno en estos dos contextos automotrices se convierte en una prioridad.

El hidrógeno tiene el potencial suficiente para poner fin a la dependencia del mundo respecto a las importaciones del petróleo. Gracias a su capacidad para ser producido a partir de fuentes de energía renovables y su capacidad de almacenamiento eficiente, el hidrógeno promete ser la energía verde por excelencia, capaz de abastecer a los sistemas de transporte con una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta transición hacia el hidrógeno no solo abriría nuevas oportunidades en términos de seguridad energética y mitigación del cambio climático, sino que también impulsaría el desarrollo tecnológico y la creación de empleo en sectores relacionados con la producción, almacenamiento y distribución de este combustible. Sin embargo, para convertir esta visión en una realidad

concreta, es esencial abordar desafíos técnicos, económicos y regulatorios, y establecer una infraestructura robusta que permita la adopción generalizada de esta fuente de energía.

Esta investigación se centra en examinar detalladamente cómo el hidrógeno puede desempeñar un papel fundamental en la revolución de la movilidad, explorando sus aplicaciones tanto en motores de combustión interna como en vehículos eléctricos con el objetivo de obtener un panorama general de las ventajas y las áreas de oportunidad que se tienen en este ámbito, además el presente proyecto de investigación tiene como objetivo proporcionar una base sólida de conocimientos y recomendaciones que puedan servir como guía para la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos futuros. Se espera que este estudio contribuya a acelerar la transformación hacia una movilidad más limpia y sostenible, impulsada por la utilización eficiente del hidrógeno como una alternativa viable y prometedora en el campo de la movilidad.

1.1. Antecedentes

Por más de un siglo se ha considerado al hidrógeno como una alternativa de combustible limpio. El uso de hidrógeno como combustible podría reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía, pues este elemento puede obtenerse de una diversa gama de fuentes domésticas, por ejemplo, el agua, en combustibles fósiles, materia orgánica, etc.

El hidrógeno comenzó a ser utilizado por la aviación en los años 20, cuando los alemanes decidieron utilizarlo como combustible secundario de los zepelines (dirigibles) que cruzaban el Atlántico. Hasta entonces el hidrógeno servía solo para mantener la fuerza de ascensión de dirigibles y globos. La historia acabó en 1937, cuando el célebre Hindenburg* se incendió justo antes de aterrizar en Nueva Jersey (EUA), en medio de una tormenta eléctrica, lo cual significó el fin del uso de dirigibles como medio de transporte a tal grado que en algunos países como Alemania fueron prohibidos, sin embargo, en la actualidad se está retomando la idea de utilizar dirigibles como medio de transporte con capacidades de hasta 100 personas.

[1]

Fue hasta los años 50 cuando ingleses y alemanes experimentaron el uso de hidrógeno en motores de combustión en coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos, pero debido a sus antecedentes no tuvieron mucho éxito. La segunda oportunidad llegó en 1973, con la crisis del petróleo, en donde las investigaciones para encontrar un sustituto del petróleo se retomaron, pero la crisis pasó y las investigaciones finalizaron, sin embargo, ya existen antecedentes y hoy en día no comenzamos de cero en este ámbito.

La idea de utilizar al hidrógeno como combustible no es nueva, pues estaba citada por Julio Verne en su novela La Isla Misteriosa, publicada en 1874, la cual se lee textualmente como:

“...creo que el agua se usará un día como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada y simultáneamente, producirán una fuente de calor y de luz inagotable y de una intensidad mucho mayor que la de la hulla**. Un día el pañol de los vapores y el tender de las locomotoras en vez de carbón se cargarán de esos dos gases

* El Hindenburg fue un dirigible alemán, una de las aeronaves más grandes jamás construidas.

** La hulla es un tipo de carbón mineral que contiene entre un 80 y 90% de carbono.

comprimidos, que arderán en los hornos con un enorme poder calorífico. No hay que temer, [...] cuando estén agotados los yacimientos de hulla, se producirá calor con agua. El agua es el carbón del porvenir.”²

1.2. Planteamiento del problema

Desde la revolución industrial se ha presentado un importante crecimiento de las economías y de los niveles de vida a nivel global. Una parte fundamental de este desarrollo ha sido el acceso a la energía producto del petróleo debido a su facilidad de extracción, transporte y almacenamiento, sustituyendo en gran medida a las energías utilizadas en el pasado, tales como el agua, el viento, la madera o el carbón.

Si bien el petróleo ha contribuido significativamente en el desarrollo de las industrias y con ello el desarrollo de la humanidad haciendo más fácil nuestras vidas, su uso en cantidades tan importantes ha provocado consecuencias que nos conducen en un plazo no muy lejano a tener dificultades en su disponibilidad debido al incremento de la demanda y a las limitaciones de la capacidad de extracción. Por otro lado, el uso desmedido del petróleo ha dejado un impacto negativo en nuestro medio ambiente, pues su uso ha implicado un incremento exponencial de los gases de efecto invernadero, lo que ha contribuido significativamente al calentamiento global.

Por primera vez somos conscientes del impacto tan negativo sobre el medio ambiente por el riesgo de un cambio climático que podrá tener graves consecuencias sobre nuestro entorno. Por lo tanto, en la actualidad nos toca buscar no solo un sustituto, sino un producto con capacidades similares a las del petróleo que nos permita mantener los niveles de desarrollo y de bienestar, pero al mismo tiempo que se vea una importante disminución de emisiones contaminantes que se desechan al medio ambiente y así lograr reducir la huella de carbono, conocido actualmente como descarbonización.

Esta búsqueda de alternativas se ha convertido en una prioridad global, y diversas soluciones están siendo exploradas en múltiples ámbitos. Una de las principales estrategias es el impulso

² Julio Verne, (1874). *La isla misteriosa*.

a las energías renovables, como la solar, eólica, geotérmica y la hidroeléctrica, que ofrecen fuentes de energía más limpias y sostenibles, liberando cantidades mínimas o nulas de gases de efecto invernadero. Además, se están investigando y promoviendo tecnologías más eficientes y limpias en sectores clave como el transporte, la industria y la agricultura. La movilidad eléctrica, por ejemplo, representa una alternativa prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir significativamente las emisiones de carbono asociadas a la combustión de gasolina y diésel.

CAPÍTULO II

EL HIDRÓGENO

En este capítulo exploraremos el hidrógeno, comenzando con un repaso histórico que abarca desde su descubrimiento hasta su reconocimiento como elemento químico fundamental. Posteriormente, analizaremos sus características y propiedades únicas, así como algunas ventajas y desventajas de su uso como combustible. También abordaremos las técnicas más comunes utilizadas para su producción, almacenamiento y distribución, considerando las distintas formas en que el hidrógeno se presenta.

Después del *Big Bang*, los protones y los electrones se combinaron para formar principalmente hidrógeno (H) y algo de Helio (He). Por ello, el hidrógeno es el elemento más abundante del universo; se estima que el 90% de todos los átomos del universo son hidrógeno y, en masa, se constituye alrededor del 75%. En su forma más común y estable, el átomo de hidrógeno consta de un protón y un electrón.

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica. Es el elemento químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón y es estable en forma de molécula diatómica, es decir formada por dos átomos de hidrógeno, de ahí que normalmente el hidrógeno se exprese como (H₂). En la tierra es muy abundante, constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo, pero se encuentra combinado con otros elementos, por tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético como la electricidad y por ello se tiene que “fabricar”. [3]

2.1. Historia del hidrógeno

La historia del hidrógeno se remonta aproximadamente al año 1500. En esta época vivió el alquimista suizo más célebre de todos, cuyo nombre era T. Von Hohenheim, mejor conocido como Paracelso (1493-1541). Paracelso fue el primero en observar que cuando a las limaduras de hierro se les añadía ácido sulfúrico, se desprendía un gas de la reacción, el cual se presentaba en forma de burbujas y éstas eran inflamables, sin embargo, no sabía que estaba tratando con un elemento químico no descrito entonces.

Paracelso no fue consciente de que ese gas que se desprendía de la reacción era un nuevo elemento químico, y tuvieron que pasar ciento cincuenta años antes de que Robert Boyle (1627-1691) considerado como el padre de la química, redescubriera en 1671 gracias a sus experimentos la reacción entre limaduras de hierro y ácidos diluidos, y se diera cuenta que el gas que emanaba de la reacción era hidrógeno en forma gaseosa, sin embargo, solo lo conocía como “aire inflamable”. Boyle estableció el concepto de elemento químico; para él, un elemento era una sustancia que no podía ser descompuesta en otras sustancias, mientras que, un elemento al combinarse con otro se creaba un compuesto.

Fue hasta 1766 que el físico y químico británico Henry Cavendish (1731-1810) describió por primera vez al hidrógeno como elemento químico; además demostró que este gas, en combinación con oxígeno, forma agua.

En 1783 el químico, biólogo y economista Antoine Lavoisier (1743-1794) le puso nombre al gas descubierto, y le denominó hidrógeno “hidro-agua, genos-generator”.

En 1806, el ingeniero suizo François Isaac de Rivaz (1752-1828) inventó un motor de combustión interna que operaba con una mezcla inflamable de hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, el automóvil que ideó para este motor no tuvo éxito.

En 1833 el físico y químico británico Michael Faraday (1791-1867) descubrió las leyes que siguen el proceso de electrolisis, siendo capaz de generar hidrógeno a partir de agua.

En 1838 el químico germano-suizo Christian Schönbein (1799-1868) descubrió los principios de la pila de combustible al combinar H_2 y O_2 para producir agua y una corriente eléctrica.

En 1842 el químico, físico y juez galés Sir William Robert Grove (1811-1896) durante 1839 y 1845 desarrolló lo que él denominó “baterías de gas”, lo que hoy en día conocemos como pilas de combustible.

En 1863, el ingeniero belga Jean Joseph Etienne Lenoir (1822-1900) creó el Hippomobile, un automóvil histórico y significativo considerado como el primer vehículo propulsado por un motor de combustión interna. El vehículo utilizaba un motor de combustión interna que funcionaba con una mezcla de hidrógeno y oxígeno, fue denominado motor de gas de Lenoir.

El termino pila de combustible (*Brennstoffzelle*) fue acuñado en 1889 por el químico alemán Ludwig Mond (1839-1909) y a su ayudante Carl Langer (? -1935).

En 1959, el ingeniero norteamericano Harry Karl Ihrig (1898-1960), presentó un tractor agrícola Allis-Chalmers el cual fue el primer vehículo de carretera que fue propulsado por una pila de combustible.

2.2. Características y propiedades

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, pero curiosamente no abunda en la atmósfera terrestre, debido a que su pequeña masa dificulta su retención en el campo gravitatorio terrestre. Es el décimo elemento más abundante en la superficie terrestre, normalmente se encuentra en forma de agua, cubriendo casi el 80% del planeta. También se encuentra en combustibles fósiles, materia orgánica, etc. Es el elemento más simple de la tabla periódica con un número atómico igual a 1, se compone de un solo electrón y un protón. Como la mayoría de los gases, se encuentra en la naturaleza en forma diatómica, lo que significa que sus átomos se unen mediante enlaces covalentes compartiendo electrones. Sin embargo, cuando se somete a altas temperaturas se puede disociar y combinarse con otros elementos. La molécula de hidrógeno es la molécula más pequeña conocida. En condiciones

normales el hidrógeno se encuentra en forma de gas, el cual es inoloro, incoloro e insípido. Se dispersa fácilmente en el medio ambiente y tiene buena conductividad térmica. En la tabla 1 podemos ver a detalle algunas de las propiedades del hidrógeno.

Tabla 1 Propiedades del hidrógeno. Fuente: [4]

Número atómico	1	-----
Energía de enlace de electrones (ionización) en estado fundamental 1s	2.18	aJ
Masa molar, H ₂	2.016	10 ⁻³ kg/mol
Distancia media entre núcleos, H ₂	0.074	nm
Energía de disociación, H ₂ a 2H a separación infinita	0.71	aJ
Conductancia iónica de iones H ⁺ diluidos en agua a 298 K	0.035	m ² /mol · Ω
Densidad, H ₂ a 101.33 kPa y 298 K	0.084	kg/m ³
Punto de fusión a 101.33 kPa	13.8	K
Punto de ebullición a 101.33 kPa	20.3	K
Capacidad calorífica a presión constante y 298 K	14.3	kJ/K · kg
Solubilidad en agua a 101.33 kPa y 298 K	0.019	m ³ /m ²

Gracias a ciertas propiedades únicas que posee el hidrógeno puede ser utilizado como combustible, por ejemplo, posee una alta velocidad de inflamación con amplios límites de inflamabilidad, lo cual favorece como combustible para motores de combustión interna, turbinas de gas o motores a chorro, sin embargo, otras de sus propiedades deben ser controladas para que al ser utilizado en un motor de combustión interna este tenga un funcionamiento adecuado.

Un kilogramo de hidrógeno puede liberar más energía que un kilogramo de cualquier otro combustible (casi el triple que la gasolina o el gas natural), y para liberar esa energía no emite nada de dióxido de carbono (CO₂), tan sólo vapor de agua, por lo que el impacto ambiental es nulo.

En la tabla 2 podemos observar algunas propiedades relacionadas con la seguridad del hidrógeno y otros combustibles, en donde podemos observar que el hidrógeno posee una mínima energía de ignición menor en un orden de magnitud comparado con el de los demás combustibles registrados; mientras que, la temperatura de autoignición es mayor que la de

los demás combustibles registrados, por lo que esto nos ayuda a prevenir el fenómeno de la combustión prematura. El amplio rango de flamabilidad del hidrógeno permite introducir mezclas en la cámara de combustión a distintos porcentajes de combustible, desde cargas muy ligeras hasta cuatro veces la carga estequiométrica*. El coeficiente de difusión es mayor comparado con el resto de los combustibles registrados en la tabla, lo cual ayuda a que se tenga una mezcla más uniforme y en caso de que se presente una fuga, esta propiedad evita un accidente por explosión.

Tabla 2 Propiedades de seguridad del hidrógeno. Fuente: [4]

Combustible	Hidrógeno	Metanol	Metano	Propano	Gasolina	Unidad
Propiedad						
Mínima energía de ignición	20	----	290	250	240	J
Temperatura de flama	2045	----	1875	----	2200	°C
Temperatura de autoignición	585	385	540	510	230 - 500	°C
Máxima velocidad de flama	3.46	----	0.43	0.47	----	m/s
Rango de flamabilidad	4 - 75	7 - 36	5 - 15	2.5 - 9.3	1.0 - 7.6	Vol. %
Rango de explosividad	13 - 65	----	6.3 - 13.5	----	1.1 - 3.3	Vol. %
Coeficiente de difusión	6.1	1.6	2.0	1.0	0.5	$10^{-3} m^2/s$

Una propiedad importante del hidrógeno y por la cual destaca sobre otros combustibles es la densidad energética, pues es mayor que la de la gasolina, metano (gas natural) y etanol, entre otros.

En la tabla 3 se muestran las densidades energéticas del hidrógeno a diferentes condiciones, comparadas con otros combustibles. Se puede observar que en estado líquido se tiene una densidad energética mayor, por unidad de volumen. La desventaja que se presenta radica en el hecho de que en estado gaseoso el hidrógeno tiene una densidad másica muy baja, por lo

* Es la relación entre el aire y el combustible que se necesita para que la combustión sea lo más eficiente posible.

que se requiere de un 30% de hidrógeno en una mezcla estequiométrica con aire, porcentaje muy alto en comparación con el 1% que presenta la gasolina.

Tabla 3 Densidades energéticas del hidrógeno. Fuente: [4]

Condiciones de almacenamiento	Densidad de energía		Densidad
	[kJ/kg]	[MJ/m ³]	[kg/m ³]
Hidrógeno, líquido	120 000	8 700	71.9
Hidrógeno, gas a 30 MPa	120 000	2 700	22.5
Hidrógeno, gas a 20 Mpa	120 000	1 900	15.9
Hidrógeno, gas (ambiente 0.1 Mpa)	120 000	10	0.090
Hidrogeno en hidruros metálicos	2 000 – 9 000	5 000 – 15 000	-----
Hidrogeno en hidruro metálico, típico	2 100	11 450	5 480
Metano (gas natural) a 0.1 Mpa	56 000	37.4	0.668
Etanol	28 000	22 000	0.79
Metanol	21 000	17 000	0.79

En la tabla 3 se observa que, a medida que alteramos el estado del hidrógeno, su densidad de energía gravimétrica se mantiene constante, mientras que su densidad de materia experimenta cambios significativos. Además, el hidrógeno en estado líquido presenta una densidad mayor en comparación con su forma gaseosa.

En la figura 1, se puede analizar claramente el comportamiento de la densidad del hidrógeno en sus dos estados, líquido y gaseoso, en función de los incrementos de temperatura. La grafica revela que, para el hidrógeno líquido un aumento en la temperatura resulta en una disminución de la densidad. En contraste, para el hidrógeno en estado gaseoso, un incremento en la temperatura provoca un aumento en la densidad. Esta diferenciación en el comportamiento de la densidad según el estado en que se encuentra el hidrógeno es fundamental para entender sus aplicaciones y manejo según sea el contexto.

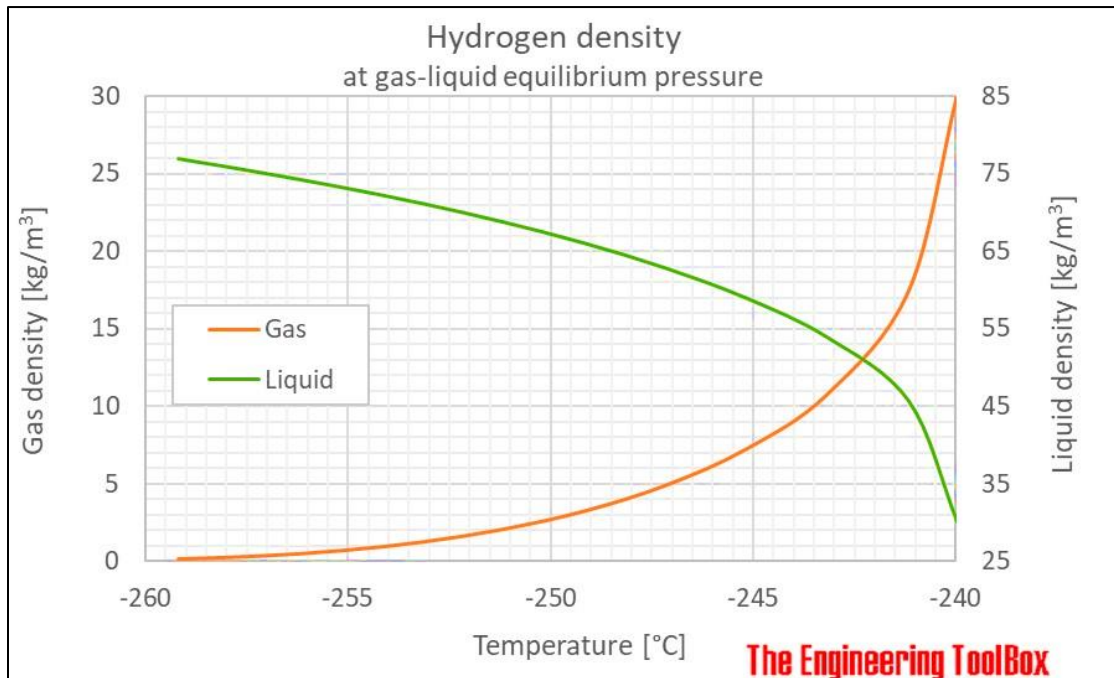


Figura 1 Densidad de hidrógeno a presión constante e incrementos de temperatura. Fuente: [5]

Además de las propiedades mencionadas anteriormente, también sabemos que 1 kg de hidrógeno ocupa:

- 12350 dm³ (estado gaseoso en condiciones normales)
- 300 dm³ (estado gaseoso a 400 atm)
- 14.3 dm³ (en estado líquido)

En la tabla 4, se muestran las ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible, proporcionando una visión clara de sus aspectos positivos y negativos.

Tabla 4 Ventajas y desventajas del uso de hidrógeno como combustible. Fuente: [Creada por el autor]

Ventajas	Desventajas
Nula emisión de gases contaminantes.	Muy baja densidad en estado gaseoso.
Alta energía por unidad de masa.	Muy baja temperatura de condensación.
Buena difusividad térmica.	Solubilidad en metales y fragilización.
Fácil de obtener de agua (H ₂ O) o de hidrocarburos.	Requiere mayor volumen de almacenamiento que la gasolina.
Apropiado para combustión o pila de combustible.	La combustión de carga pesada produce golpeteo, preignición y retroceso de flama.
Puede ser producido por fuentes renovables.	Elevado costo de producción y almacenamiento en estado líquido.
Las únicas emisiones no deseadas de la combustión son Óxido de nitrógeno (NO _x).	Desgaste más rápido de las partes de un motor, alta corrosión.
La combustión a carga ligera es muy estable.	
Alta temperatura de autoignición.	
El rango de flamabilidad es más amplio que el de la gasolina.	

2.3. Producción de hidrógeno

Como se señaló con antelación, el hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental, sino que tiene que ser extraído a partir de diversas fuentes de energía como pueden ser el agua, los combustibles fósiles y la materia orgánica con la respectiva aportación de energía. Idealmente, la energía aportada sería igual a la energía contenida en el gas sintetizado, sin embargo, la producción de hidrógeno a partir de cualquier proceso implica una transformación de energía y como sabemos, desgraciadamente las transformaciones de energía no siempre son tan eficientes y tienen asociadas pérdidas de energía.

El uso del hidrógeno como combustible no contamina, sino que sólo produce calor y agua, por lo que promete ser la energía verde por excelencia. No obstante, se necesita una fuente adicional para obtenerlo y dependiendo de cuál sea la fuente elegida emitirá o no dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Así, en el caso de la electrólisis se puede llevar a cabo a partir

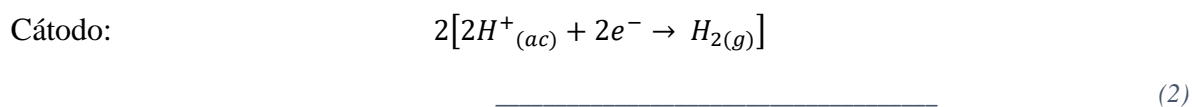
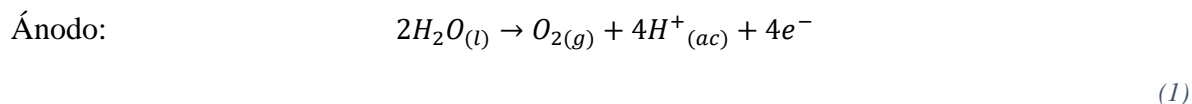
de energía nuclear o de energía eólica, siendo el proceso físico el mismo. Algo similar ocurre con los procesos de termólisis, que pueden ser activados desde la energía nuclear o desde la energía solar de alta temperatura. La gasificación es otro ejemplo de proceso que se puede aplicar al carbón siendo este combustible fósil o a la biomasa con una energía renovable.

La producción de hidrógeno no debería ser un problema toda vez que ha sido un tema muy explorado, afortunadamente los métodos para producir hidrógeno son muy variados y cuentan con diversas investigaciones para implementar los diferentes métodos de manera segura, pues hoy en día se produce hidrógeno con fines industriales mediante procedimientos suficientemente probados.

2.3.1 Electrólisis

La producción de hidrógeno mediante electrólisis es la tecnología más desarrollada comercialmente en la actualidad. La electrólisis del agua es la descomposición del agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, mediante el paso de corriente eléctrica. El agua es una fuente completa para producir hidrógeno y el único subproducto liberado durante el proceso es el oxígeno. A pesar de que la separación de la molécula de agua por medio de la electrólisis se ha utilizado durante décadas, este uso ha sido limitado a unidades pequeñas. La electrólisis no ha sido empleada en grandes plantas debido, principalmente a su baja eficiencia comparada con el reformado de vapor.

Las reacciones correspondientes son:



El proceso de electrólisis es muy sencillo, en primer lugar, se necesita un tanque lleno de agua, cabe mencionar que el agua no debe tratarse de agua destilada, puesto que lo que hace posible el paso de la corriente eléctrica a través del agua son los minerales disueltos en ella, los cuales también se separan en el proceso de electrólisis. Para mejorar la producción de hidrógeno u oxígeno mediante la electrólisis se suele variar la composición del agua, generalmente con la adición de sales para aumentar la velocidad de reacción. En la figura 2, se observa que los electrodos, el cátodo y el ánodo, se sitúan en la solución y generan el movimiento de electrones. El hidrógeno se forma en el cátodo, mientras que el oxígeno lo hace en el ánodo.

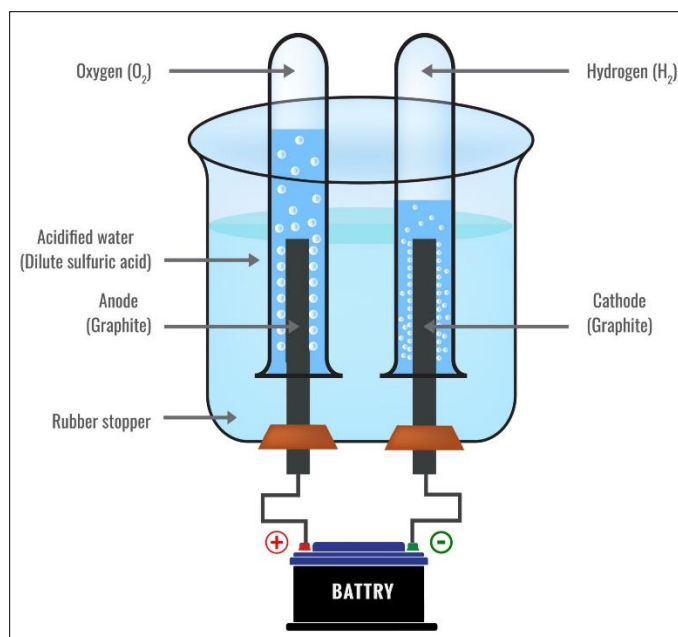


Figura 2 Electrólisis del agua. Fuente: [6]

El proceso de electrólisis tiene una eficiencia generalmente de entorno al 75%, la eficiencia de producción de energía eléctrica varía dependiendo del medio por el que se produzca, aunque la producción de hidrógeno mediante electrólisis tiene el potencial de estar completamente libre de emisiones si la electricidad se genera a partir de una fuente de energía renovable limpia como puede ser energía solar o eólica. Debido a que la electrólisis utiliza la

electricidad como fuente primaria de energía, no tiene las restricciones geográficas de otros procesos, como son por ejemplo aquellos que necesitan calor, lo cual permite una localización flexible y remota de los generadores de hidrógeno mediante electrólisis. [7]

El departamento de energía de los Estados Unidos está intentando resolver los problemas asociados a la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Han demostrado que, utilizando gas natural en lugar de aire, en el compartimiento del ánodo en un electrolizador de óxido sólido, la electricidad necesaria para la operación del sistema se reduce en gran medida. El sistema tiene la capacidad de producir hidrógeno puro o hidrógeno humidificado en niveles apropiados para usar directamente en una célula de combustible tipo PEM. Los cálculos preliminares realizados indican que utilizando este concepto el hidrógeno se podría producir a coste competitivo con la gasolina a la vez que bajarían las emisiones de dióxido de carbono. [8]

2.3.2. Termólisis

Los procesos de termólisis implican la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga, los cuales pueden ser a partir de hidrocarburo o simplemente agua, mediante la aplicación de calor. Bajo esta definición, el reformado, la gasificación y la pirólisis se pueden entender como procesos de termólisis.

La termólisis del agua, también conocida como disociación térmica del agua es una reacción de disociación que ocurre en un solo paso; es un proceso similar a la electrólisis del agua, pero utilizando calor en lugar de electricidad. Para alcanzar un grado razonable de disociación, la reacción requiere de una fuente de calor que pueda proporcionar temperaturas superiores a los 2500 K. La termólisis mediante un proceso sustentable aprovecha la energía térmica del sol por medio de concentradores solares; en esencia, se calienta el agua a tal punto que se favorece su reacción de descomposición. [9]

Aunque esta reacción es aparentemente muy sencilla, presenta dos graves inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por una parte, las elevadas temperaturas que se precisan para conseguir un grado de disociación razonable, superiores a los 2500 K dan lugar a problemas de materiales y a un aumento de las pérdidas por radiación, disminuyendo la eficiencia de

absorción y así mismo existe la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno, para evitar una mezcla explosiva.

Este principal problema se resuelve utilizando un cierto número de reacciones químicas para dividir la descomposición del agua en más pasos. La idea que subyace a los ciclos termoquímicos de separación del agua (TWSC, de sus siglas en inglés, *Thermochemical Water Splitting Cycles*) es sencilla, utilizar un bucle cerrado de dos o más reacciones químicas para impulsar la descomposición del agua y producir hidrógeno. El aporte de energía puede provenir del calor solar concentrado o del calor residual industrial, lo que convierte a los TWSC en una solución viable para la producción de hidrógeno verde. Además, gracias a los ciclos de división de agua, la temperatura de funcionamiento disminuye por lo que el hidrógeno y el oxígeno se producen en pasos diferentes, lo que elimina la necesidad de separar los gases a alta temperatura y reduce el riesgo de accidentes. [10]

2.3.3. Gasificación y reformado

La gasificación es un proceso de oxidación parcial de la materia, en presencia de cantidades de oxígeno inferiores a las requeridas estequiométricamente, es decir se tiene una combustión con defecto de oxígeno en la que se obtiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e hidrógeno (H₂), en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. El oxígeno se limita entre un 10 y un 50% del estequiométrico y la temperatura oscila entre 700 y 1500 °C. La gasificación puede aplicarse tanto a la biomasa como a los combustibles fósiles como el carbón.

El proceso básico de gasificación del carbón comienza convirtiendo el carbón en estado gaseoso calentándolo en un reactor de alta temperatura. El carbón gaseoso se trata posteriormente con un vapor y oxígeno y el resultado es la formación de hidrógeno gaseoso, monóxido de carbono y dióxido de carbono por lo que resulta, casi dos veces más caro producir hidrógeno a partir del carbón que a partir del gas natural. En la figura 3 se observa este proceso de manera esquemática.

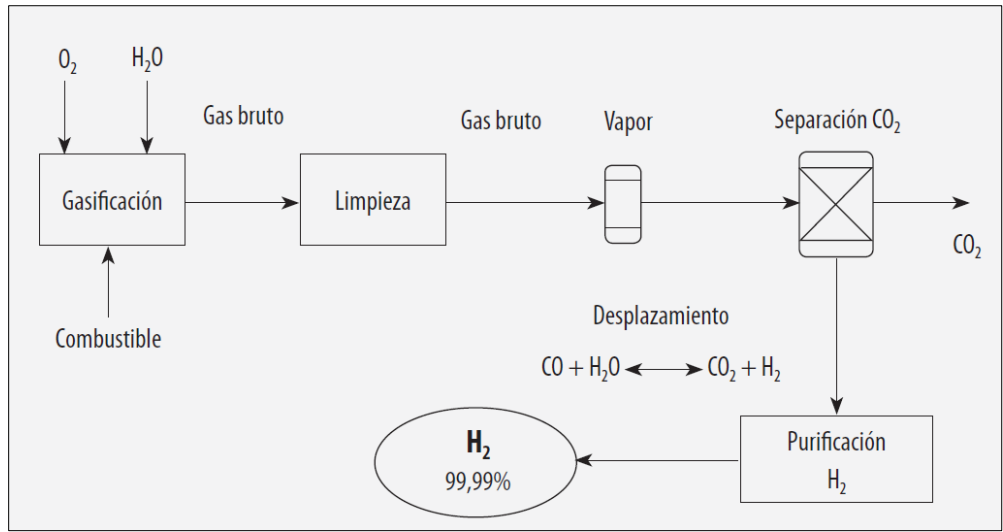


Figura 3 Proceso de gasificación. Fuente: [11]

La gasificación del carbón es el método más antiguo de producción de hidrógeno, las plantas llevan ya varios años operando, además hay grandes yacimientos de carbón en todo el mundo, por lo que este método se convierte en económicamente viable si el dióxido de carbono (CO_2) es capturado y usado para recuperar el metano atrapado en las minas de carbón, lo cual resulta rentable si se realiza en instalaciones centralizadas (constituyendo entonces el 5% de los costes de inversión). [11]

En concreto la gasificación del carbón se puede integrar adecuadamente en un ciclo combinado al que además se puede dotar de captura de dióxido de carbono (CO_2). De este modo se puede hablar de una nueva forma de cogeneración, es decir, la producción simultánea de electricidad e hidrógeno.

2.3.4. Fotólisis

Fotólisis es el término utilizado para describir la disociación de moléculas orgánicas complejas bajo la influencia de la luz solar y describe la interacción de uno o más fotones con una molécula objetivo. Uno de los métodos más atractivos para la producción sostenible de hidrógeno sin emisiones de CO_2 es el aprovechamiento de la radiación solar. El interés

radica en el enorme potencial de la energía abundante, aunque diluida, como la energía solar. Se estima que en una hora la tierra recibe energía del sol igual a la energía que usa el planeta en un año.

Hay otros métodos de producción de hidrógeno que aún se encuentran en las etapas de investigación y desarrollo, pero que algún día pueden volverse comercialmente viables, incluida la fotoelectrólisis, la producción fotobiológica y el plasmatrón.

➤ **Fotoelectrólisis**

Se trata de la producción de hidrógeno mediante la disociación del agua bajo la influencia de la radiación solar utilizando fotocatalizadores químicos.

➤ **Producción fotobiológica**

Este proceso requiere el uso de luz solar, un componente biológico, catalizadores y un sistema controlado. Los organismos, las algas y algunas bacterias producen hidrógeno como subproducto de sus procesos metabólicos. Estos organismos viven principalmente en el agua y la descomponen en sus componentes elementales.

➤ **Plasmatrón**

En este enfoque, el plasma frío no térmico, se utiliza como fuente de energía para acelerar las reacciones químicas. El plasma presenta un desequilibrio térmico que hace posible un plasma en el cual la temperatura del gas puede estar cerca de la temperatura ambiente, produciendo así un plasma en el que los electrones se excitan lo suficiente como para romper los enlaces moleculares.

Es deseable que el hidrógeno sea producido de forma sustentable, esto significa que la producción de hidrógeno no daña el medio ambiente gracias al uso de energías y materiales renovables. Las principales fuentes de energía renovables que se pueden utilizar incluyen la energía solar y la eólica. Las materias primas renovables incluyen agua y biomasa (recursos orgánicos). Los procesos sustentables de producción de hidrógeno son, por tanto, la fotólisis, la termólisis o la electrolisis del agua y la producción fotobiológica.

Como vemos, existen diferentes métodos de producción de hidrógeno que dan como resultado diferentes tipos de hidrogeno. Éstos están clasificados por colores según el método de producción a partir del cual se obtiene el hidrógeno. La denominación de los colores del

hidrógeno viene dada en función de la forma de producirlo y es un indicador de la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que se libera durante el proceso, es decir, que tan “limpio” es. Cada tipo de hidrógeno tiene diferentes propiedades, ventajas y desventajas y su uso depende en gran medida del costo, de la disponibilidad de recursos y la infraestructura requerida para su producción y uso.

El hidrógeno según su forma de producirlo se clasifica en seis colores, los cuales son:

- **Negro:** Es el que tiene la huella de carbono más grande porque está hecho de combustibles no renovables como el petróleo y el carbón, es el más contaminante y el menos sostenible.
- **Marrón:** Es un producto de la gasificación del carbón y se libera CO₂ durante su producción, aunque se considera un sistema de producción de bajas emisiones, no está del todo libre de ellas.
- **Gris:** Se obtiene al hacer pasar gas natural por vapor de agua, utilizando la técnica del reformado con vapor. El proceso utiliza combustibles no renovables y genera emisiones de CO₂, este sistema de producción es actualmente el más utilizado.
- **Azul:** Utiliza gas natural como materia prima, a diferencia del hidrógeno gris, durante su producción se emplean tecnologías que reducen o eliminan la huella de carbono del proceso. Además, durante su producción es posible separar el dióxido de carbono del hidrógeno para inyectarlo en formaciones geológicas profundas. Produce bajas emisiones de CO₂, inferiores a los mencionados anteriormente.
- **Rosa:** Este tipo de hidrógeno se caracteriza porque se obtiene por electrólisis, utilizando energía nuclear; el uso de energía nuclear no puede considerarse renovable. El hidrógeno rosa se puede producir a gran escala, además la energía nuclear es una de las más económicas, lo que hace que el hidrógeno sea más barato de producir que el hidrógeno verde. Se clasifica como hidrógeno bajo en carbono ya que, es más ecológico que el hidrógeno gris debido a que la energía nuclear tiene bajas emisiones de CO₂.

Una ventaja de este tipo de hidrógeno es que la energía nuclear es constante, es decir, depende de los fenómenos meteorológicos, como ocurre con la energía solar y la eólica. Si el día está nublado, o no hay viento fuerte, no se producirá la misma energía,

sin embargo, el hidrógeno rosa se puede producir durante todo el día sin importar el tipo de clima.

- **Verde:** Es el único hidrógeno libre de emisiones de CO₂ a la atmósfera, es producido mediante la electrolisis del agua, un proceso que utiliza una corriente eléctrica para separar el hidrógeno del oxígeno en el agua. Utiliza electricidad procedente de fuentes renovables como la fotovoltaica, la eólica o la hidroeléctrica. En definitiva, genera energía sin emitir dióxido de carbono a la atmósfera.

La figura 4, ofrece un resumen visual de la clasificación de hidrógeno basada en su método de producción, el proceso utilizado y el índice de emisiones asociado. Esta clasificación de colores facilita la comprensión de las diferentes categorías de hidrógeno y sus impactos ambientales.

	NEGRO	MARRÓN	GRIS	AZUL	ROSA	VERDE
Fuente de energía 	Carbón bituminoso	Lignito	Hidrocarb. (gas natural principalmente)	Hidrocarb. (gas natural)	Energía nuclear	Renovables
Proceso más usado 	Gasificación de carbón	Gasificación de carbón	Extracción con vapor (reformado)	Extracción con vapor	Electrólisis (separación mediante electricidad)	Electrólisis
Emisiones asociadas 	Muy altas	Muy altas	Altas	Medias (incluye sistemas de captura de carbono)	Bajas	Bajas o nulas

Figura 4 Los colores del hidrogeno. Fuente: [12]

2.4. Almacenamiento

Para poder adentrarnos al tema de almacenamiento del hidrógeno hay que tener claro un término tan importante como lo es la densidad. Hay que tener presente que todo elemento tiene un lugar en el espacio esto quiere decir que tiene una masa y un volumen, la densidad

se entiende entonces como la relación entre la masa de una sustancia y el volumen que este ocupa en el espacio, y se puede expresar de la siguiente manera.

$$\rho = \frac{m}{v} = \left(\frac{kg}{m^3}, \frac{lb}{ft^3} \right)$$

(4)

Donde:

- ρ : densidad de la sustancia.
- m : masa.
- v : volumen.

Teniendo en cuenta esta definición podemos adentrarnos al tema de almacenamiento del hidrógeno esto debido a que es un elemento que contiene una baja densidad energética, haciendo que este gas complique dicha acción, sin embargo, hay métodos para poder lograrlo, esto depende del uso en el que se va a emplear. Por tanto, podemos mencionar algunas formas de almacenamiento dependiendo del estado en que se encuentra el hidrógeno.

2.4.1 Hidrógeno comprimido

Ésta es la forma más convincente y de la cual se ha tenido un mayor desarrollo debido a que se aprovecha el efecto de compresión sobre volumen de gas, sin embargo, hacer que el aire se comprima requiere un aumento de consumo energético esto con la finalidad de tener la presión final requerida, por lo tanto, existen dos formas en el cual podemos almacenar gas los cuales son tanques de presión y microesferas de vidrio.

- Tanque de presión

El hidrógeno tiende a tener presión, entre mayor es la presión más gas de hidrógeno es almacenado, para poder lograr esto se están desarrollando cilindros de acero, fibras de carbón o aluminio para así mantener una presión aproximada de 700 bares, esto con la finalidad de soportar altas presiones, un aumento para evitar esfuerzos a la ruptura, baja densidad para reducción del peso del tanque. En esta forma de almacenamiento hay que tener en cuenta otra cualidad del hidrógeno, que es su capacidad difusiva, por ende, se tiene que sellar toda clase

de escape. Actualmente se tiene un gran avance, pero para poder comercializarlos se deben hacer algunas mejoras, donde la más importante es el tema de la seguridad, es decir la resistencia del cilindro y el costo que estos tendrán por los materiales que se manejan. En la figura 5 tenemos los cuatro tipos de depósitos para almacenamiento de hidrógeno.

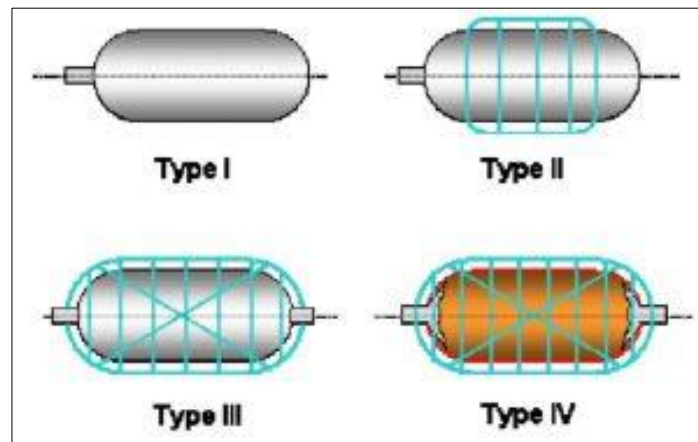


Figura 5 Tipos de tanques de presión. Fuente: [13]

- **Tipo I:** Estos tanques no cuentan con costura y están hechos de acero (200 bares) o aluminio (175 bares), llegan a ser pesados, tienen paredes gruesas haciendo que el peso total del tanque lleno solamente el 1% sea hidrógeno. Normalmente se utiliza para almacenar hidrógeno comprimido para laboratorios.
- **Tipo II:** Igual que el anterior este no cuenta con costuras, están hechos de acero o aluminio, sin embargo, cuentan con un refuerzo de fibra de carbono o vidrio en la dirección del aro en la sección cilíndrica del depósito, haciéndolos más resistentes (700 - 1000 bares). Su uso principal es para almacenar hidrógeno para automoción o aplicaciones estacionarias.
- **Tipo III:** Estos tanques pueden tener o no costura con forro metálico para evitar fuga de hidrógeno por difusión, los tanques que llegan a ser duraderos son los que tienen fibra de carbono como material compuesto (700 bares), la mayor parte de la carga estructural es por el material compuesto y se elimina lo de las paredes gruesas haciéndolas más ligeras.

- **Tipo IV:** En estos se tiene un forro de material plástico (polietileno de alta densidad) reforzado con fibras de carbono en distintas direcciones recubriendo el forro, en la parte externa se tiene un recubrimiento de fibra de vidrio (700 bares), ya no cuenta con gran parte metálica, por ende, es mucho más ligero, pero el forro interno de plástico es mala barrera a la difusión del hidrógeno.

- **Microesferas de vidrio**

Este método aprovecha la permeabilidad de hidrógeno a presiones entre 350 - 700 bares y temperaturas de aproximadamente 300 °C en los huecos de las microesferas (ver figura 6) haciéndolos resistentes a la presión, al último la temperatura se nivela a temperatura ambiente haciendo que el gas se retenga en las microesferas.



Figura 6 Microesferas de vidrio. Fuente: [14]

2.4.2. Hidrógeno líquido

Es una forma de almacenamiento más complejo debido a que para tener hidrógeno líquido se debe tener una temperatura de -235 °C, para poder hacer esto es necesario utilizar tanques especiales de acero inoxidable o aleación de aluminio con doble capa con otro fluido criogénico intermedio, como puede ser el nitrógeno líquido, o también un aislado térmico mediante vacíos llamados Dewar, en la figura 7 se muestra un ejemplo de estos tanques. El

interior de estos tanques está hecho de materiales con baja conductividad térmica como fibra de plástico reforzada con carbono o vidrio.



Figura 7 Taque de almacenamiento de hidrógeno tipo Dewar. Fuente: [15]

Sin embargo, ésta es una forma no tan buena debido a que, para tener hidrógeno líquido se requiere una gran cantidad de energía la cual se utiliza para comprimir y después enfriar en un intercambio de calor, una vez teniendo esto, pasa por una válvula de expansión la cual lo hace líquido. En este cambio de fase tiene un inconveniente, ya que se llega a tener una evaporación de hidrógeno, presentando así una pérdida del elemento, añadiendo el riesgo de inflamabilidad si el escape se lleva a cabo en un espacio cerrado. Considerando que el acero al carbono a temperaturas bajas se llega a tener fragilidad provocando una fractura en este. El hidrógeno líquido puede beneficiar siempre y cuando se llegue a tener la posibilidad económica y que el gasto energético sea consumido en el menor tiempo posible.

2.4.3. Hidrógeno sólido

El almacenamiento en sólidos se debe a que en su composición molecular llega a ser un compuesto sólido, originado por dos procesos, reacción y adsorción, haciéndolo así más seguro y eficiente. El almacenamiento puede constar de varias formas como son:

➤ Hidruros metálicos

Existen una gran cantidad de hidruros metálicos, sin embargo, son aleaciones metálicas de magnesio, níquel, hierro y titanio. A estos los podríamos enlazar metálicamente con el hidrógeno.

El proceso de la combinación del metal con el hidrógeno debe ser reversible, esto quiere decir que se pueden combinar y deben volver a su estado original (hidrógeno-metal). Otro factor por considerar es la obtención de resistencia a ciclos de carga o descarga y tener estabilidad a los contaminantes que pudiera presentar al cambio de fase, los cuales pueden ser oxígeno o humedad del ambiente impidiendo el enlace químico con en el hidrógeno.

Durante los cambios de fase pudiéramos mencionar a la adsorción, la cual se define como el momento en el que los metales de alta presión absorben el hidrógeno formando los hidruros metálicos, y en caso de que se caliente a baja presión, los metales liberan el hidrógeno previamente absorbido. En dado caso de que se tenga alguna merma por contaminación, ésta llegará a recuperarse por medio de desorción con calor ya sea alta o baja temperatura.

Los de alta temperatura llegan a ser menos costosos y el almacenamiento es mayor, no obstante, el consumo térmico al momento de la desorción es muy elevado; mientras que, los de baja temperatura tienden a tener pérdidas por la liberación no controlada a condiciones ambientales, haciendo el proceso más completo. A continuación, se mencionarán algunas ventajas y desventajas de este método.

Las ventajas que llegan a tener son:

- La seguridad es mejor, esto se debe a que se liberan los hidruros a bajas presiones.
- La manipulación sobre los almacenamientos sólidos es a presión baja y a temperatura ambiente.
- No requieren altas presiones o temperaturas criogénicas para operar.
- Se utilizan compuestos de sodio, potasio, litio para reaccionar con H_2O y así liberar el hidrógeno.

Desventajas que se llegan a presentar:

- Llega a haber un elevado peso de los equipos.
- El coste de los equipos es considerable.
- No se tiene una recuperación controlada de residuos de hidróxido de sodio.
- Su estructura presenta una desventaja considerable, ya que son granos esto con la finalidad de aumento superficial disponible para el almacenamiento del hidrógeno, provocando un desgaste en el sistema de almacenamiento.

➤ Hidruros no metálicos.

Como se ha mencionado anteriormente, se pueden formar hidruros metálicos pero el coste de este es elevado, por ende, se hizo el mismo método con una diferencia, que en esta ocasión se utilizarían elementos menos pesados y así formar enlaces iónicos o covalentes. Algunos compuestos químicos que se pueden mencionar son: amoníaco, metanol, metano o ácido fórmico, estos llevan una gran cantidad de hidrógeno en la molécula haciendo su almacenamiento indirecto.

Utilizando este tipo de hidruros tenemos resultados positivos, ya que almacenan más hidrógeno por unidad de masa, sin embargo, su mayor desventaja es que lamentablemente el proceso no llega a ser reversible.

➤ Estructuras porosas (carbono)

Otra forma de almacenamiento sólido es interactuando con materiales porosos como lo es el carbón activo, nanotubos de carbono y nano fibras de grafito. El proceso que se realiza es por absorción, utilizando fuerzas electrostáticas entre el átomo de carbono y las moléculas de hidrógeno.

Algunas situaciones que se tienen que considerar al utilizar este tipo de almacenamiento de hidrógeno son:

- Los materiales presentan microporos, así que se deben tener en cuenta debido a que llega a determinar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno.
- Área superficial elevada.
- Llegan a tener resistencia mecánica apoyando el reforzamiento estructural, alta resistencia a tracción y gran elasticidad.
- La interacción que se llega a tener es débil no afectando el material haciendo que la carga/descarga de hidrógeno sea rápido y reversible.
- Se debe tener en cuenta que dependiendo de la temperatura a la que se encuentre el hidrógeno absorbido, será dependiente de la presión aplicada.
- Las nanoestructuras de carbono tienen una baja masa, pero mayor capacidad de adsorción a diferencia del grafito, el detalle es que esto solo es posible a temperaturas bajas (inferiores a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) ya que, si se deja a temperatura ambiente, se evapora una gran cantidad de hidrógeno.
- Este método aun no es del todo confiable debido a que se tienen pocas referencias de las investigaciones, se desconoce la cantidad que se puede almacenar en un nanotubo o en una nano fibra, así como, si hay enlace químico del hidrógeno con el nanotubo de carbono o si se tiene la estructura molecular.

2.5. Distribución

Tras almacenar el hidrógeno, debemos pensar en la forma de distribuirlo, cuya logística se determina principalmente en función del consumo y las necesidades. Actualmente y debido a una demanda puramente industrial de hidrógeno, los medios de transporte que se tienen son los siguientes.

- Por carretera en tanques presurizados.
- Por ferrocarril o barco en tanques presurizados o depósitos criogénicos.
- Mediante hidrógeno ductos.

A medida que avance la sociedad del hidrógeno y su uso energético se generalice, se podrá pasar a su transporte masivo canalizado, hoy en día reservado a los grandes consumidores.

La forma de distribución dependerá del estado en que se encuentre el hidrógeno, pudiendo ser en forma de gas comprimido o incluso líquido en algunos casos. El transporte masivo canalizado y la distribución del hidrógeno en diferentes estados físicos abrirán el camino hacia un futuro energético más limpio, sostenible y diversificado.

2.5.1. Hidrógeno gaseoso a alta presión

Hay varias opciones para distribuir el hidrógeno a alta presión. La primera división se refiere a la cantidad de hidrógeno requerida. En el caso de cantidades muy grandes o para uso industrial, la distribución suele realizarse mediante gasoductos adaptados. En cambio, si la distribución corresponde a aplicaciones puntuales o de bajo volumen, se hará a través de botellas o tanques de capacidad media.

Sí se necesita cierto suministro constante de hidrógeno a gran escala, la opción más económica es la distribución a través de gasoductos. Estos pueden transportar gas natural a alta presión, y hasta el 30% de hidrógeno se puede mezclar con el contenido sin la necesidad de realizar modificaciones en la línea. Por esta razón, las líneas existentes, que previamente se dedicaron al transporte de gas natural, se pueden adaptar para otros usos o bien continuar en funcionamiento, pero de una forma más rentable. El único inconveniente es que debe haber un sistema capaz de separar el hidrógeno del gas natural en los puntos de recepción del gas.

Otra forma de transportar hidrógeno gaseoso a alta presión es por carretera. Este transporte se lleva a cabo utilizando un contenedor cilíndrico a una presión de entre 200 y 600 bar. A este tipo de camiones, se les denomina “*tube trailers*”, y generalmente transportan entre 60 y 460 kg de hidrógeno (ver figura 8). La ventaja de este tipo de sistema es que además de transportar hidrógeno, el mismo camión se puede utilizar para transportar otros gases a alta presión.



Figura 8 Tube tráiler para transporte de hidrógeno. Fuente: [16]

2.5.2. Hidrógeno líquido

El hidrógeno en estado líquido tiene una gran variedad de posibilidades para su distribución. El transporte puede ser por carretera, por ferrocarril o por mar. Otra opción cuando se desea un transporte de hidrógeno altamente eficiente es el transporte por tuberías.

Para el transporte por carretera, se utilizan semirremolques equipados con depósitos Dewar de gran capacidad (entre 48 y 52 mil litros, aunque algunos depósitos especiales llegan a tener capacidades de hasta 80 mil litros). Estos depósitos están bien aislados y sus pérdidas por evaporación conocido también como *boil-off* suelen ser del 0.25%/día (si se supone un depósito de 50 mil litros, las pérdidas por *boil-off* diarias serían de 12.5 litros/día). Un dato interesante es que un camión que transporta hidrógeno en estado líquido es equivalente a 15 o 30 camiones que transportan hidrógeno de alta presión, lo cual representa un ahorro significativo del transporte de hidrógeno por carretera en contraste con el hidrógeno de alta presión.

En el caso del transporte por ferrocarriles, se usan tanques cilíndricos Dewar horizontales, lo que garantiza una mayor estabilidad durante el transporte del tanque. La capacidad de estos depósitos suele rondar los 10 mil litros. El transporte de contenedores por mar debe ser considerado para el suministro a largas distancias, en este caso también se utilizan tanques Dewar, con capacidades que pueden llegar al millón de litros.

Otra forma para el suministro del hidrógeno líquido sería a través de una tubería aislada que incluya también un cable superconductor. El hidrógeno líquido actuaría como refrigerante para el superconductor y permitiría el transporte de energía eléctrica eliminando las pérdidas de las líneas eléctricas convencionales. Los problemas principales para el transporte del hidrógeno líquido son los especiales requerimientos de aislamiento y las pérdidas durante el bombeo y el enfriamiento del hidrógeno líquido a lo largo del transporte.

Es necesario evaluar cuál es la forma más adecuada para el transporte del hidrógeno: ya sea en estado gaseoso, líquido o a través de portadores líquidos. Basándonos en estos criterios, la figura 9 muestra una tabla que identifica la opción de transporte más recomendable según la distancia y el volumen requerido para el traslado.

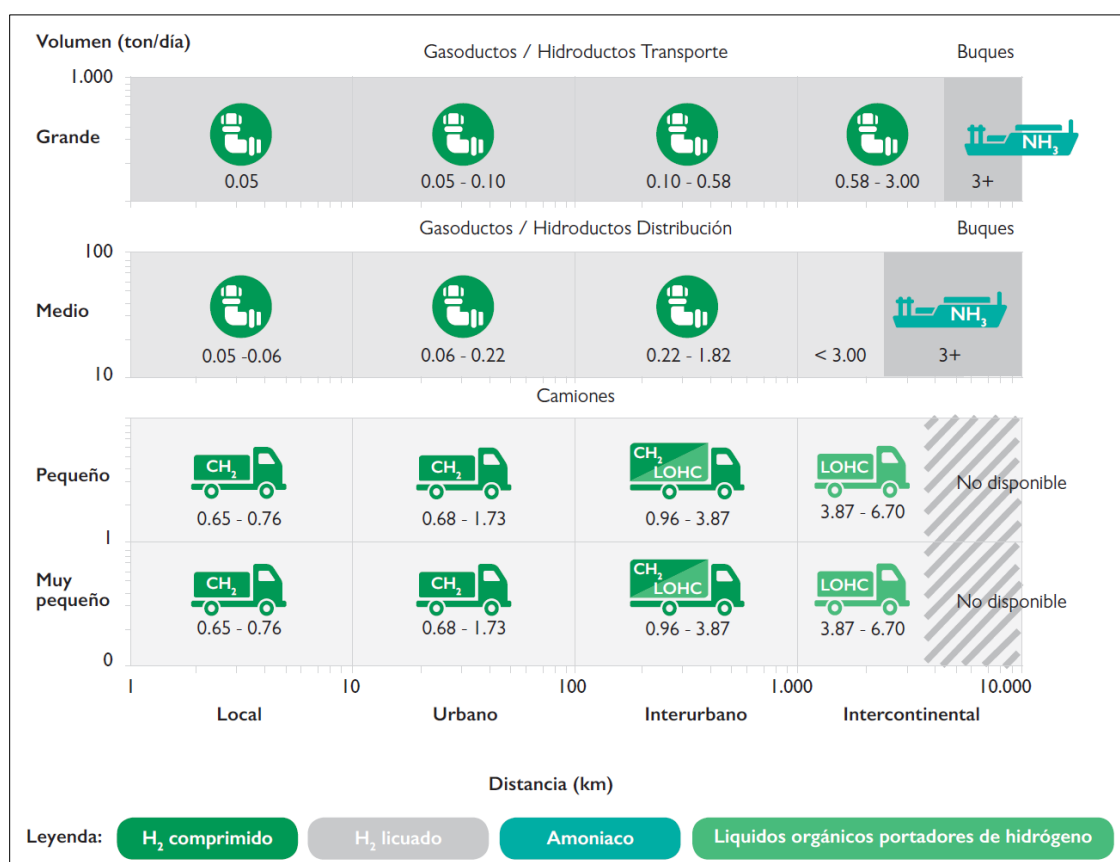


Figura 9 Costes de transporte de hidrógeno en función de la distancia y volumen (\$/kg). Fuente: [17]

2.5.3. Hidrogeneras

Las hidrogeneras son instalaciones diseñadas para producir, almacenar y distribuir hidrógeno. La distribución de hidrógeno a través de hidrogeneras, también conocidas como estaciones de servicio de hidrógeno o estaciones de recarga de hidrógeno, son un componente fundamental para el suministro de hidrógeno como combustible para vehículos de celda de combustible de hidrógeno (FCEV, por sus siglas en inglés) y otras aplicaciones industriales.

A pesar de que el hidrógeno ha sido empleado en la industria a lo largo de varios años, su utilización segura por parte de personal no especializado es una novedad. Este cambio requerirá un diseño de dispensadores de manejo extremadamente sencillo, resistentes a fugas y errores. La velocidad de repostado es un problema técnico, que afectará al diseño del esquema de carga y dependerá del tipo de combustible que se imponga (hidrógeno comprimido, licuado o combinado en un compuesto líquido). La figura 10 muestra un esquema simplificado de una hidrogenera propuesto por la empresa LINDE.

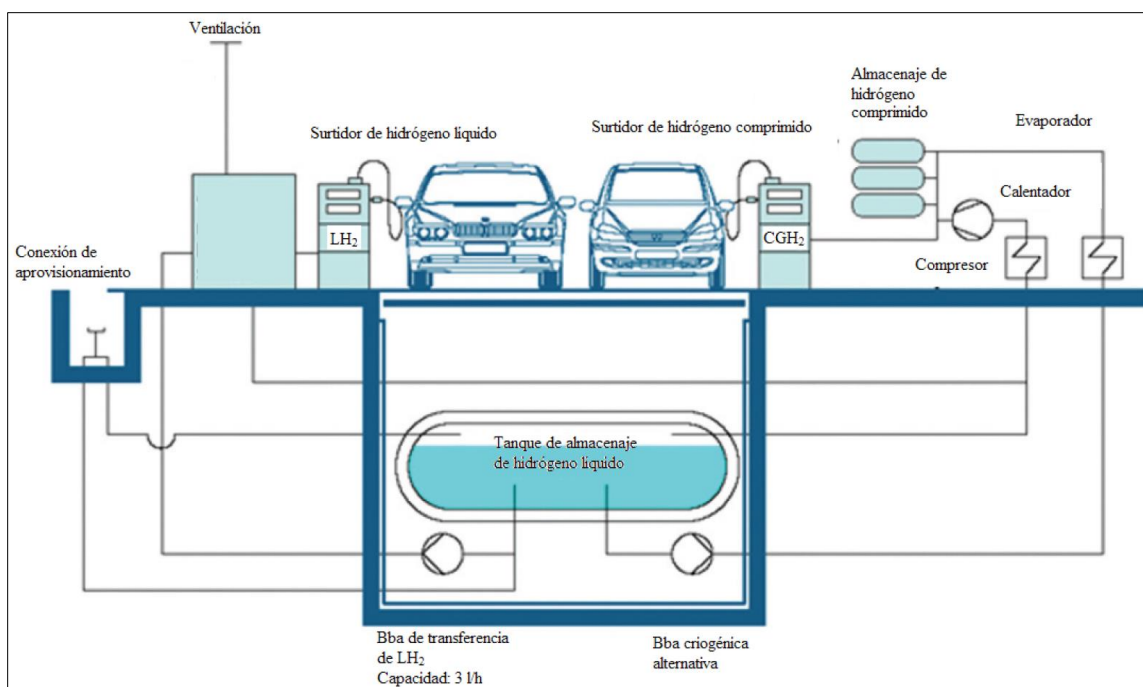


Figura 10 Esquema de hidrogenera propuesta por Linde. Fuente [18]

Las estaciones de servicio actuales, destinadas al suministro de gasolina para nuestros vehículos, constituyen el punto de partida en la evolución hacia hidrogenas, si bien requerirán adaptaciones notables. Entre los componentes fundamentales de la estación de servicio que experimentarán ajustes significativos debido a la implementación del hidrógeno se encuentran el surtidor, el sistema de carga, el almacenamiento, los protocolos de seguridad y el proceso de abastecimiento. Por último, las compañías energéticas tienen requerimientos bien definidos: minimizar los costes de transporte, lo que obliga a estas empresas a buscar el sistema de suministro óptimo de manera prioritaria.

Hay dos métodos principales para distribuir hidrógeno a través de hidrogenas, las que tengan producción “in situ”, es decir en el lugar y las que se provean de hidrógeno producido de forma externamente. Para ambos la seguridad, no sólo del cliente, sino de su personal y de toda la instalación, es una prioridad.

- **Producción en el lugar (in situ):** En este enfoque, el hidrógeno se produce directamente en la estación de servicio utilizando métodos como la electrólisis del agua o la reforma de hidrocarburos. Este método puede proporcionar una fuente de hidrógeno limpia si se utiliza la electrólisis con electricidad de fuentes renovables.
- **Suministro de hidrógeno almacenado:** El hidrógeno se transporta a la estación de servicio desde una planta de producción centralizada y se almacena en tanques a alta presión. Luego, el hidrógeno se distribuye a los vehículos a través de un proceso de recarga similar al de la gasolina o diésel en una estación de servicio convencional.

La distribución de hidrógeno a través de hidrogenas enfrenta desafíos técnicos y logísticos debido a la naturaleza del hidrógeno, que es un gas ligero y altamente inflamable. Se requieren medidas de seguridad estrictas en el manejo, almacenamiento y transporte del hidrógeno para garantizar un funcionamiento seguro de las estaciones de servicio de este combustible, sin embargo, en algunas ciudades de España se está iniciando con la instalación de estaciones de servicio de hidrógeno como se muestra en la figura 11.



Figura 11 Primera hidrogenera para suministro de hidrógeno a 700 bar en España. Fuente: [19]

Hoy en día las estaciones de servicio de hidrógeno van en aumento y, gracias a plataformas como la h2stations.org podemos tener un seguimiento de la expansión de la infraestructura de hidrogeneras a nivel global. La h2stations.org es una plataforma en línea que proporciona una base de datos detallada y actualizada de estaciones de servicio de hidrógeno en todo el mundo (ver figura 12). Su objetivo principal es rastrear y presentar información relevante sobre estaciones de servicio de hidrógeno, incluyendo ubicaciones, características técnicas, capacidad de almacenamiento, tipos de combustible de hidrógeno (comprimado, licuado, etc.), fabricantes de equipos y otros detalles relacionados.

Esta plataforma facilita el seguimiento de la expansión de la infraestructura de hidrogeneras a nivel global y proporciona información clave para el desarrollo y la planificación de proyectos relacionados con el hidrógeno como combustible alternativo. La h2stations.org no proporciona información sobre la disponibilidad actual de una estación de hidrógeno, pero proporciona una visión global de la infraestructura existente, planificada y completada.

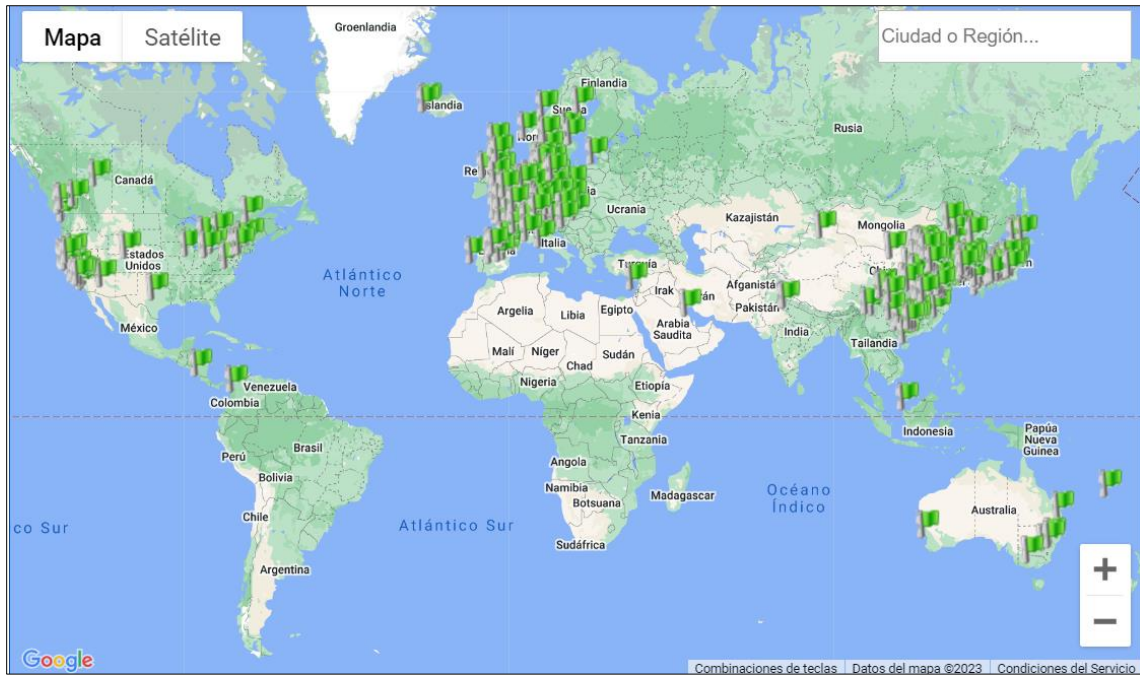


Figura 12 Estaciones de hidrógeno en operación en el mundo. Fuente: [20]

CAPÍTULO III

EL HIDRÓGENO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Después de haber analizado las características, los métodos de producción, almacenamiento y formas de distribución del hidrógeno, en este capítulo, procederemos a discutir la aplicación del hidrógeno como combustible directo en motores de combustión interna.

El hidrógeno ha sido reconocido ampliamente como un combustible que posee ciertas propiedades adecuadas para su aplicación en motores de combustión interna, por ejemplo, tiene mayores prestaciones potenciales en relación energía/peso que cualquier otro combustible, y además genera una muy reducida emisión contaminante, ya que sólo libera vapor de agua en su combustión, sin embargo, en aire produce óxidos de nitrógeno, los cuales pueden atraparse mediante catalizadores adecuados. Estos rasgos hacen del hidrógeno un excelente combustible para cumplir potencialmente con los controles ambientales cada vez más rigurosos para las emisiones de los dispositivos de combustión, incluyendo la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Como vimos en el capítulo 2.3 el hidrógeno se puede producir de diferentes fuentes de energía, y reemplazar incrementalmente las fuentes de agotamiento de los combustibles fósiles convencionales.

3.1. Historia

A lo largo de la historia, el uso del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna ha sido objeto de investigación y experimentación, aunque su adopción en aplicaciones comerciales ha sido limitada debido a diversos desafíos técnicos y económicos. El primer registro que se tiene fue en el año de 1807, donde el político suizo Francois Isaac de Rivaz (1752-1828) inventó un primitivo motor de combustión interna, el cual estaba propulsado por una mezcla de hidrógeno y oxígeno encendido manualmente por chispa eléctrica. Fue el primer automóvil impulsado por combustión interna del mundo. (Ver figura 13)

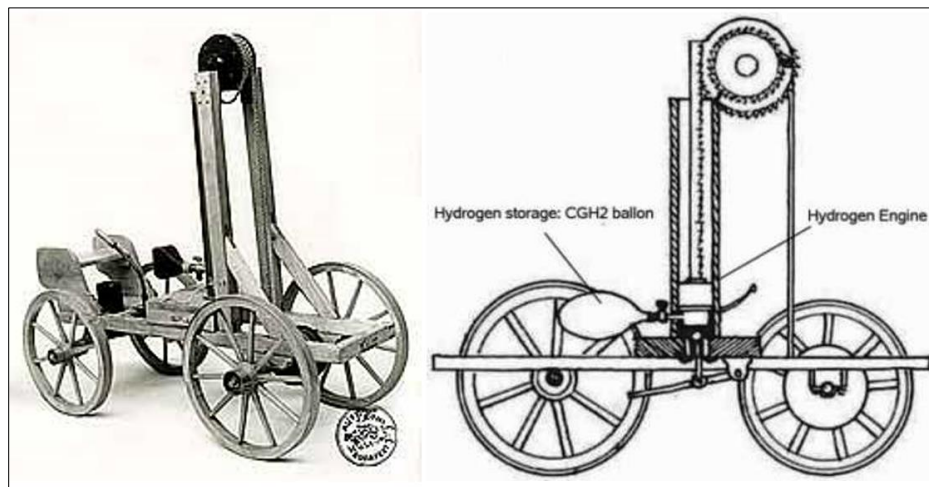


Figura 13 Primer automóvil de combustión interna de hidrógeno. Fuente:[21]

En 1860, Etienne Lenoir de Francia inventó el hipomóvil de 1 cilindro y 2 tiempos, conocido como el "Lenoir Hippomobile". Este vehículo fue uno de los primeros en utilizar un motor de combustión interna para la propulsión. En la figura 14 se observa el diseño del motor y vehículo de Lenoir.

El motor del Hippomobile de Lenoir funcionaba con hidrógeno como combustible, que se generaba mediante la electrolización del agua. El hidrógeno resultante se dirigía al pequeño motor horizontal de un cilindro y dos tiempos. El motor operaba en lo que Lenoir describió como "ciclos naturales", que consistían en la absorción de la mezcla de combustible

(hidrógeno) y una carrera descendente en la que se quemaba el combustible agotado. Posteriormente, Lenoir adaptó su motor para funcionar con varios gases, incluido el gas de carbón. Esta adaptación amplió la flexibilidad del motor y lo hizo más versátil en términos de fuentes de combustible.

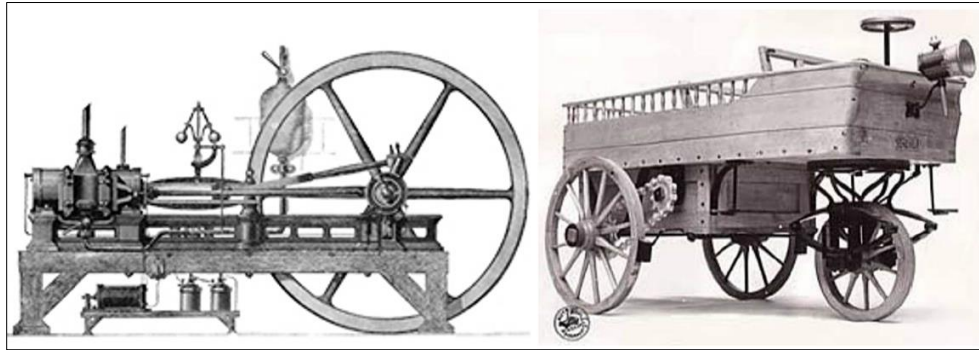


Figura 14 Motor y vehículo ideado por Lenoir. Fuente: [22]

En total, se estima que se construyeron y vendieron alrededor de 350 a 400 de estos motores de gas Lenoir durante ese período. Aunque la producción y venta de estos motores representaron un avance significativo en la tecnología de motores de combustión interna, la adopción generalizada de vehículos motorizados y la utilización de hidrógeno como combustible enfrentaron desafíos tecnológicos, económicos y de infraestructura en ese momento. La contribución de Etienne Lenoir con su Hippomobile marcó un hito en la evolución de los motores de combustión interna y sentó las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la propulsión a base de hidrógeno y otras fuentes de energía.

En 1933, se revivió el proyecto de desarrollar un automóvil propulsado por hidrógeno. En este caso, la empresa de energía Norsk Hydro tomó la iniciativa al llevar a cabo un estudio con uno de sus pequeños camiones, al cual transformaron para que funcionara utilizando gas hidrógeno como combustible. El camión de Norsk Hydro mostrado en la figura 15 fue equipado con un reformador de amoníaco a bordo. Este reformador tenía la función de extraer hidrógeno del amoníaco y suministrarlo al motor de combustión interna del camión.

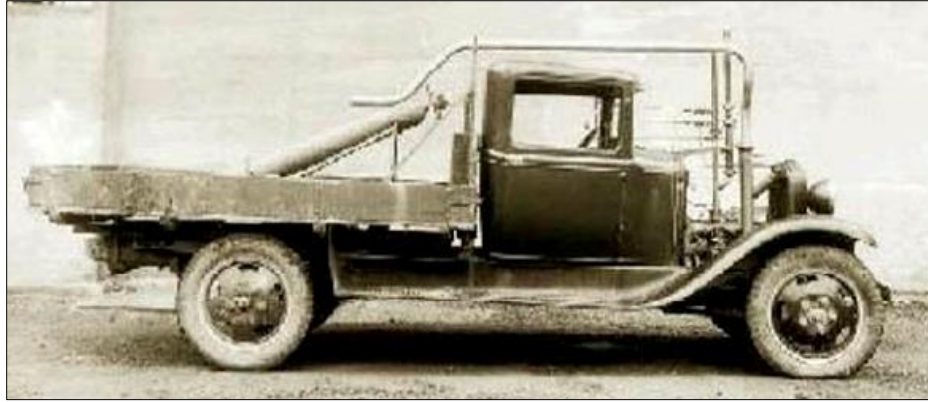


Figura 15 Camión de Norsk Hydro convertido para funcionar con hidrógeno. Fuente: [22]

El proceso general involucraba la descomposición del amoníaco (NH_3) en sus componentes, nitrógeno e hidrógeno, mediante un proceso químico conocido como reformado. El hidrógeno resultante se dirigía al motor de combustión interna del camión, donde se quemaba para generar energía y propulsar el vehículo. Este experimento con el camión Norsk Hydro demostró una de las primeras aplicaciones prácticas de un sistema de propulsión basado en hidrógeno. A pesar de que no se logró establecer una adopción generalizada en ese momento, el trabajo realizado por Norsk Hydro sentó las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la propulsión a base de hidrógeno.

En 1941, durante el asedio de las tropas del régimen nazi a Leningrado durante la Segunda Guerra Mundial, surgió una situación de escasez de gasolina en la ciudad. Ante esta situación, el soldado y mecánico ruso Boris Shelishch transformó unos 200 camiones soviéticos GAZ-AA para que funcionaran utilizando gas de hidrógeno como combustible. Lo más destacado de esta conversión fue que los camiones modificados no solo lograron mantener su funcionalidad, sino que también mostraron un rendimiento mejorado. [21]

Se volvió a hablar intensamente del hidrógeno en la década de los 80, cuando BMW y Mercedes-Benz presentaron vehículos que podían funcionar con hidrógeno y gasolina. Se trataba del 520h y el 280 TE, respectivamente. El BMW 520h contaba con un motor de 3.5 litros y tanques criogénicos para usar hidrógeno gaseoso como combustible. [23]

En 2006 BMW fabricó un centenar de Hydrogen 7, un BMW 750 movido por un motor V12 modificado para funcionar con hidrógeno. El V12 de ese BMW era un motor bivalente que funcionaba con gasolina e hidrógeno, equipaba el mismo V12 de 6.0 litros, pero desarrollaba una potencia de 260 HP, una cifra mucho más baja que los 450 HP del motor original de gasolina.

Este propulsor estaba preparado para funcionar indistintamente con gasolina e hidrógeno y el conductor tenía la opción de seleccionar uno u otro combustible desde un botón en el volante. Una vez que el hidrógeno se agotaba, el motor se alimentaba automáticamente de gasolina. Entre ambos propulsores, el coche tenía una autonomía de unos 700 km. [24]

Desde entonces, el hidrógeno ha tenido un papel destacado en diversos proyectos espaciales. En los últimos años, el creciente interés por la calidad del aire y las regulaciones más rigurosas en cuanto a la contaminación atmosférica, combinados con el anhelo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, ha reavivado el interés en el hidrógeno como una opción viable de combustible para vehículos.

En la actualidad, la atención se centra en la investigación y desarrollo de motores de combustión interna capaces de operar de manera eficiente utilizando hidrógeno como su fuente de energía. Sin embargo, existen varios desafíos que deben ser abordados, como la necesidad de optimizar el diseño de los motores, regular la combustión y las emisiones, y solucionar los problemas asociados con el almacenamiento y la distribución del hidrógeno.

3.2. Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son máquinas térmicas que convierten la energía química contenida en un combustible en energía mecánica a través de una serie de procesos de combustión que ocurren internamente en una cámara de combustión. Generalmente hay dos tipos principales de motores de combustión interna: los motores de encendido por chispa (motores de gasolina) y los motores de encendido por compresión (motores diésel).

- **Motor de encendido por chispa:**

En los motores de encendido por chispa, también conocidos como motores de gasolina, la mezcla de aire y combustible es comprimida en la cámara de combustión. Luego, una bujía genera una chispa eléctrica que enciende la mezcla, creando una explosión controlada. Esta explosión de gas caliente y expandiéndose empuja un pistón dentro de un cilindro, generando movimiento. La energía cinética del pistón se transmite a través de una biela a un cigüeñal, convirtiendo el movimiento lineal en rotativo y, finalmente, en movimiento útil.

- **Motor de encendido por compresión:**

En los motores de encendido por compresión, también conocidos como motores diésel, el aire es comprimido dentro del cilindro a una relación de compresión mucho mayor que en los motores de gasolina. La temperatura resultante de esta compresión es suficientemente alta para encender el combustible diésel cuando es inyectado en la cámara de combustión. A diferencia de los motores de gasolina, los motores diésel no requieren bujías para encender el combustible. En su lugar, el calor generado por la compresión es suficiente para lograr la ignición. Al igual que en los motores de gasolina, la energía de la explosión mueve el pistón y se convierte en movimiento mecánico.

Un motor de combustión está constituido por una gran cantidad de componentes, aunque los principales componentes para llevar a cabo la combustión son los siguientes:

- I. **Cilindro:** Es la parte principal del motor donde ocurre el proceso de combustión. El pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo dentro del cilindro.
- II. **Pistón:** Es un componente móvil que se desplaza dentro del cilindro en respuesta a la explosión del combustible. La fuerza generada por el pistón se transmite a través de una biela al cigüeñal.
- III. **Cigüeñal:** Transforma el movimiento lineal del pistón en movimiento rotativo y posteriormente en movimiento útil.
- IV. **Bujía:** (En motores de gasolina), genera la chispa eléctrica necesaria para encender la mezcla de aire y combustible.

- V. **Sistema de inyección:** Introduce el combustible en la cámara de combustión en un momento determinado para la ignición.

Existen dos tipos de motores principales: los motores de 2 tiempos y los motores de 4 tiempos. Sin embargo, debido a los considerables problemas de contaminación asociados con los motores de 2 tiempos, estos han perdido popularidad en muchos contextos, por lo tanto, nos enfocaremos en los motores de 4 tiempos, que han demostrado ser una alternativa más limpia y eficiente en el ámbito de los motores de combustión interna.

Los motores de 4 tiempos siguen un ciclo preciso compuesto por cuatro etapas distintas, lo que lo hace más eficiente y menos perjudicial para el medio ambiente. Estas etapas, conocidas como admisión, compresión, combustión y escape, se combinan para lograr la conversión de energía química en energía mecánica.

1. **Admisión:** En el momento que el pistón está en el punto más alto conocido como punto muerto superior (PMS), la válvula de admisión se abre y el propio pistón por el vacío que se crea dentro del cilindro aspira la mezcla (aire y combustible) hasta llegar al punto más bajo del cilindro también conocido como punto muerto inferior (PMI). Durante esta etapa, la válvula de escape permanece cerrada. En el caso de los motores diésel, el procedimiento es básicamente el mismo a diferencia que en estos se aspira únicamente aire fresco.
2. **Compresión:** Con las válvulas de admisión y escape cerradas, el pistón empieza a ascender comprimiendo la mezcla de aire y combustible (en el caso del motor a gasolina) hasta llegar al punto muerto superior (PMS). La relación de compresión es relativamente alta, lo que aumenta la temperatura y la presión de la mezcla. Esta compresión hace que la mezcla sea más propensa a la ignición. En el motor diésel lo único que se comprime es el aire previamente aspirado.
3. **Combustión o expansión:** Cuando el pistón alcanza el punto muerto superior del cilindro en la carrera de compresión, la bujía (en el caso de motores de gasolina) emite una chispa eléctrica. Esta chispa enciende la mezcla comprimida de aire y combustible, generando una rápida expansión de gases calientes. En el motor diésel una vez que se ha llegado al punto más alto del cilindro, el inyector se encarga de inyectar el combustible dentro del cilindro. La propia presión del aire enciende la

mezcla, aumenta la presión en el cilindro. En ambos casos la expansión de gases empuja el pistón hacia abajo, generando fuerza y movimiento. En esta carrera de expansión es donde se realiza el trabajo útil.

4. **Escape:** En ambos motores, después de la explosión, cuando el pistón llega al punto muerto superior (PMS), se abre la válvula de escape y el pistón empieza a ascender empujando los gases resultantes de la combustión hacia el sistema de escape. Mientras tanto, la válvula de admisión permanece cerrada. Una vez que los gases se han expulsado y el pistón llega nuevamente a la parte superior del cilindro, el ciclo se repite comenzando con la carrera de admisión.

La figura 16 muestra un esquema detallado del ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos, ilustrando claramente las distintas fases del ciclo.

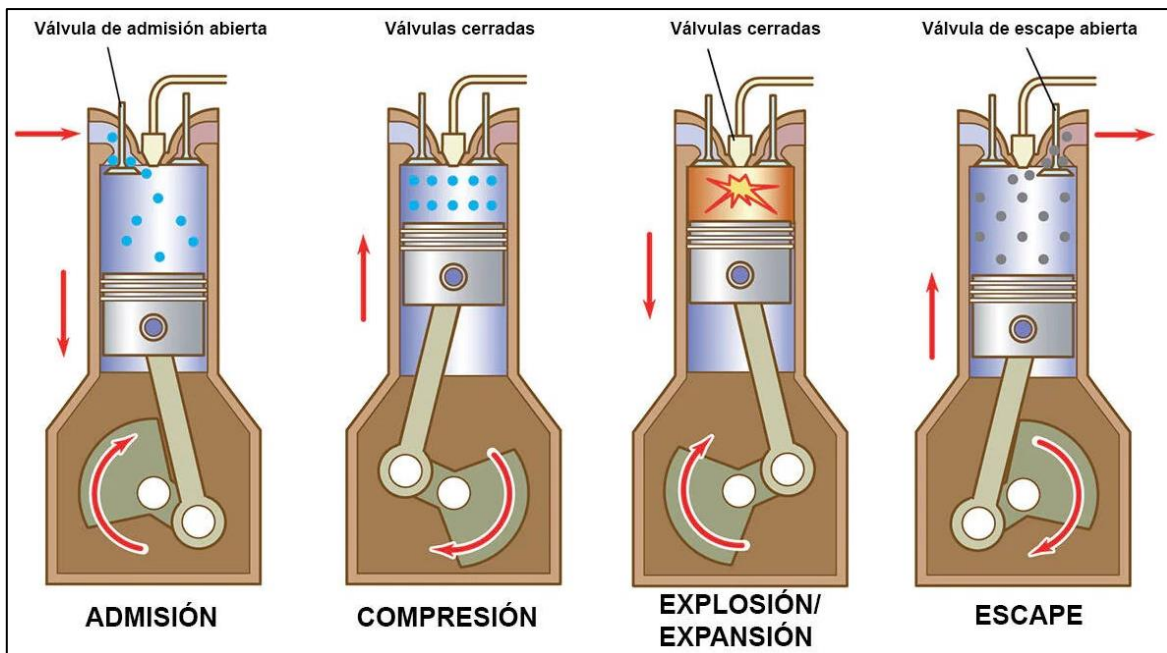


Figura 16 Ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos. Fuente: [49]

Las últimas investigaciones impulsan el desarrollo de motores de hidrógeno, que ofrecen un rendimiento superior y disminuyen las emisiones de óxidos nitrosos (NOx) en condiciones de alta carga del motor. En lo que respecta a los avances conseguidos en la investigación

sobre motores de combustión interna que utilizan hidrógeno como fuente de energía, tres áreas específicas han cobrado especial relevancia: la optimización de los inyectores, la mejora de las mezclas de combustible y el desarrollo de sistemas de enfriamiento eficaces.

Los inyectores en uso en la actualidad están diseñados para suministrar combustibles convencionales, ajustando las concentraciones y temperaturas del combustible según sea necesario. Por consiguiente, es esencial llevar a cabo modificaciones en estos componentes a fin de adecuarlos para el uso de hidrógeno como combustible. Las características de las mezclas con las que los motores han de operar necesitan ser distintas, ya que los atributos necesarios para lograr una combustión eficiente, como la relación de compresión y la temperatura de ignición, varían significativamente con respecto a los combustibles tradicionales. Además, dado que el hidrógeno posee temperaturas de combustión distintas, el sistema de enfriamiento debe ser especialmente preciso para garantizar un funcionamiento adecuado. [26]

La capacidad de los motores de combustión interna que utilizan hidrógeno como combustible para operar con emisiones prácticamente nulas se debe principalmente a dos características únicas del hidrógeno:

- Los óxidos nitrosos (NOx) son las únicas emisiones no deseadas, y se forman debido a la disociación térmica y la oxidación del nitrógeno presente en el aire atmosférico durante el proceso de combustión.
- El bajo límite de flamabilidad del hidrógeno a cargas ligeras posibilita una combustión estable en condiciones de alta dilución.

El uso de hidrógeno en motores de combustión interna tiene el potencial de aprovechar la infraestructura desarrollada originalmente para motores alimentados con productos derivados del petróleo. Esto permite realizar las modificaciones necesarias para adecuarlos al uso de hidrógeno como combustible.

3.3. Sistemas de inyección

Los sistemas de inyección de combustible en motores de combustión interna son componentes esenciales que regulan el suministro preciso de combustible al motor en función de las condiciones de operación y las demandas de rendimiento. Estos sistemas han evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, pasando de sistemas de inyección mecánicos a sistemas de inyección electrónica más avanzados y precisos. La inyección de combustible tiene un impacto directo en la eficiencia del motor, las emisiones y el rendimiento general del vehículo.

El propósito original de la inyección de combustible fue obtener la máxima potencia de un motor al asegurar una mezcla de aire y combustible precisa y controlada. Con la evolución de la tecnología de los motores de combustión interna, se reconoció que los sistemas de inyección de combustible ofrecen un mayor control sobre la cantidad y el momento en que se introduce el combustible en la cámara de combustión. Esto permitió optimizar la eficiencia del proceso de combustión y, por lo tanto, aumentar la potencia y el rendimiento del motor. [26]

Los sistemas de inyección en los motores de gasolina y diésel presentan notables diferencias. En los motores de gasolina, la inyección de combustible se realiza durante la carrera de admisión, en el colector frente a la válvula. En contraste, en los motores diésel, la inyección se lleva a cabo casi al término de la carrera de compresión, directamente en la cámara de combustión. Por ello es necesario analizar cada sistema por separado.

3.3.1. Motores de ignición por compresión

Los sistemas de inyección en motores diésel son componentes fundamentales que determinan cómo y cuándo se introduce el combustible diésel en la cámara de combustión para su ignición. Este sistema es un componente necesario para la operación de un motor de ignición por compresión debido a que el sistema de inyección es el encargado de iniciar y controlar el proceso. La operación satisfactoria de los motores diésel depende de un adecuado

control de flujo de aire y de la inyección del combustible. El sistema ideal de combustión debe tener salida y eficiencia altas, combustión rápida, un escape limpio y debe ser silencioso.

En el sistema de inyección, identificamos dos componentes fundamentales: la bomba de inyección y los inyectores. Los inyectores son los encargados de dispersar el combustible en forma de fina pulverización hacia cada cilindro del motor, siendo el combustible suministrado por la bomba de inyección. Por su parte, la bomba de inyección proporciona la cantidad precisa de combustible a cada inyector en el momento oportuno y con la presión adecuada.

Tipos de inyección

Los sistemas de inyección en motores diésel pueden dividirse en dos categorías principales: inyección directa e inyección indirecta. Ambos enfoques tienen diferencias significativas en cómo se introduce el combustible en la cámara de combustión y cómo se logra la ignición. La figura 17 muestra las diferencias de estos sistemas de inyección de manera esquemática.

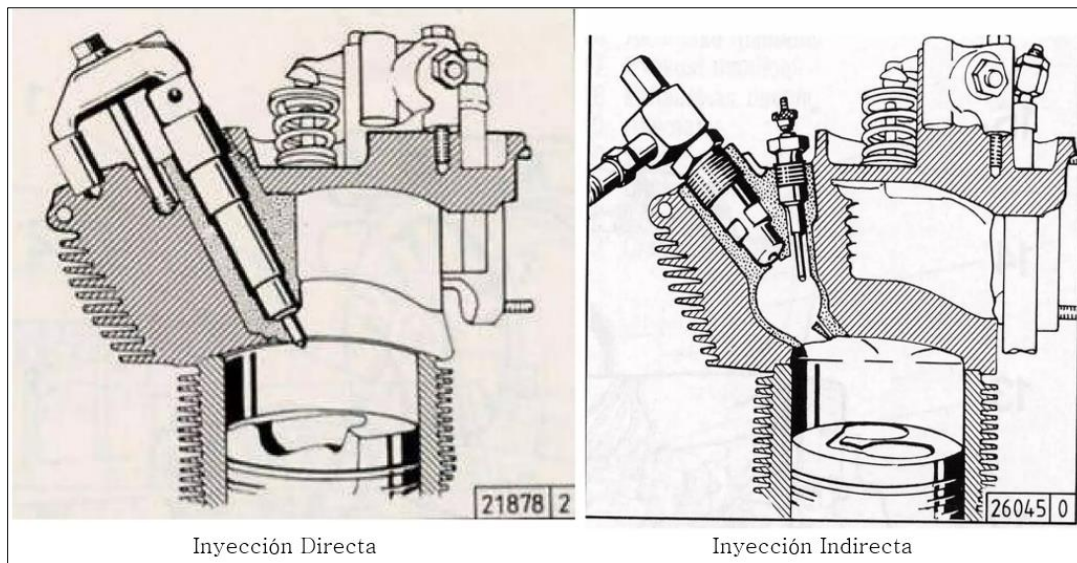


Figura 17 Tipos de inyección en motores diésel. Fuente: [27]

- **Inyección directa:** El combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión, donde se encuentra el aire altamente comprimido. Este proceso ocurre justo antes del punto de ignición, y la alta temperatura y presión en la cámara permiten que el combustible se encienda por sí mismo, sin la necesidad de una chispa. La inyección directa permite un mayor control sobre el proceso de combustión, ya que el combustible se coloca exactamente donde es necesario para lograr una mezcla más homogénea y una combustión más eficiente. Esto se resulta en un mejor rendimiento, mayor potencia y una reducción de emisiones contaminantes.
- **Inyección indirecta:** Estos también son conocidos como motores de cámara dividida. Esto se debe a la particular geometría de la cámara de combustión. Ésta se encuentra formada por una precámara ubicada en la culata, que está conectada a la cámara principal a través de una garganta. El combustible se inyecta en una precámara o cámara de precombustión separada del cilindro principal. Una vez que el combustible se encuentra en la precámara, se enciende a través de una bujía de encendido. La combustión resultante crea altas presiones que fuerzan la entrada del aire y el combustible a la cámara principal del cilindro, donde se produce la combustión principal. Este sistema tiende a ser más común en motores diésel de vehículos más antiguos y motores de menor potencia. Aunque la inyección indirecta puede ser menos eficiente y generar más emisiones en comparación con la inyección directa, puede ofrecer ventajas en términos de vibración y ruido reducido.

Como vimos, los sistemas de inyección directa e indirecta en motores diésel representan enfoques diferentes para la administración del combustible y la combustión, sin embargo, la inyección directa se ha convertido en la opción más común en los motores diésel modernos debido a su eficiencia, menor emisión y mayor control sobre la combustión.

3.3.2. Motores de ignición por chispa

En los vehículos a gasolina se busca la mezcla ideal de aire y gasolina con el fin de obtener una combustión completa en el cilindro. En la búsqueda de obtener una mezcla cada vez más eficiente, el suministro de combustible ha evolucionado desde la utilización del carburador hasta la aplicación de la inyección electrónica utilizada actualmente. La inyección

ha sufrido grandes cambios desde su origen, pasando por la inyección mecánica con los carburadores (obsoletos en automóviles desde 1990 aproximadamente) hasta los sistemas electrónicos. Ésta última ha evolucionado mediante diferentes sistemas y sensores incorporados al vehículo, con el fin de disminuir el consumo de gasolina y reducir considerablemente los gases contaminantes.

En los motores con carburador, el aire debe arrastrar al combustible, por depresión, a través de conductos calibrados. Esto genera efectos de inercia por la diferencia de densidad y rozamiento del aire y de la gasolina, que dificultan la elaboración correcta de las mezclas. En los sistemas de inyección electrónica, estos efectos no tienen lugar porque la cantidad de combustible inyectado no depende directamente de la depresión creada en el conducto de aspiración.

Los sistemas de inyección se pueden distribuir de las siguientes formas:

1. Dependiendo del lugar donde se produce la inyección de combustible.

Inyección indirecta: La inyección de combustible se produce en la bifurcación del colector de admisión o justo antes de la válvula de admisión, que puede estar en posición abierta o cerrada. En este tipo de sistema, se pueden encontrar tanto carburadores como inyectores, cada uno con sus características específicas.

Inyección directa: La inyección de combustible se produce directamente en la cámara de combustión. Este sistema permite reducir drásticamente el consumo y mejorar la combustión disminuyendo los gases contaminantes. Este tipo de inyección solo se puede lograr mediante el uso de inyectores.

La figura 18 ofrece un esquema que ilustra claramente cada uno de los sistemas mencionados anteriormente.

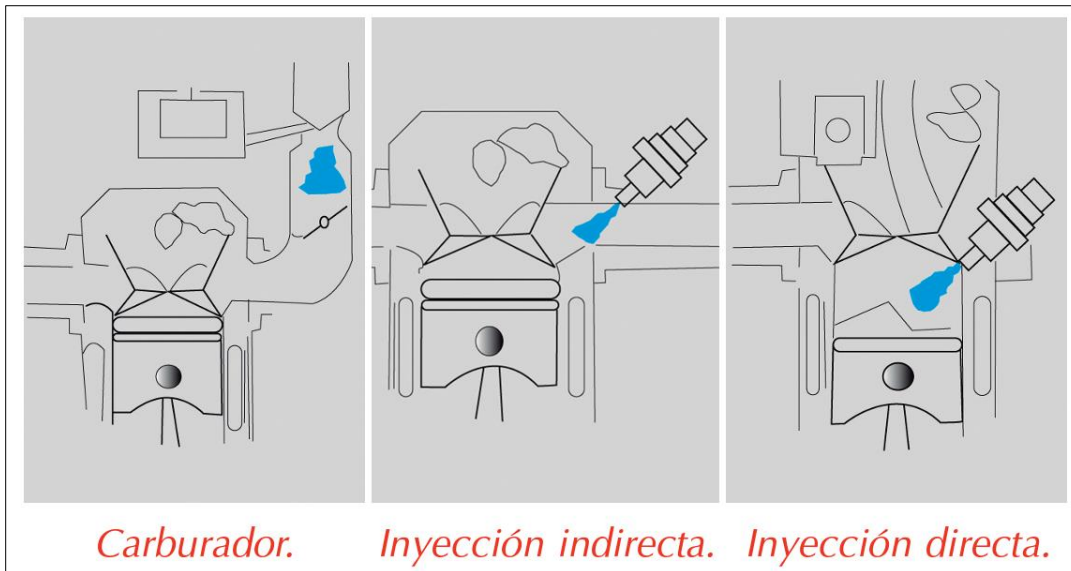


Figura 18 Tipos de inyección según el lugar donde se produce la inyección. Fuente: [28]

2. Según la cantidad de inyectores (ver figura 19).

Inyección monopunto: Se dispone de un solo inyector de combustible como sustituto del carburador para todos los cilindros, ubicado detrás de la mariposa de gases de admisión, produciendo la inyección en el colector de admisión.

Inyección multipunto: En este caso se tiene un inyector por cada cilindro, la inyección puede producirse en el colector de admisión o directamente en el cilindro.

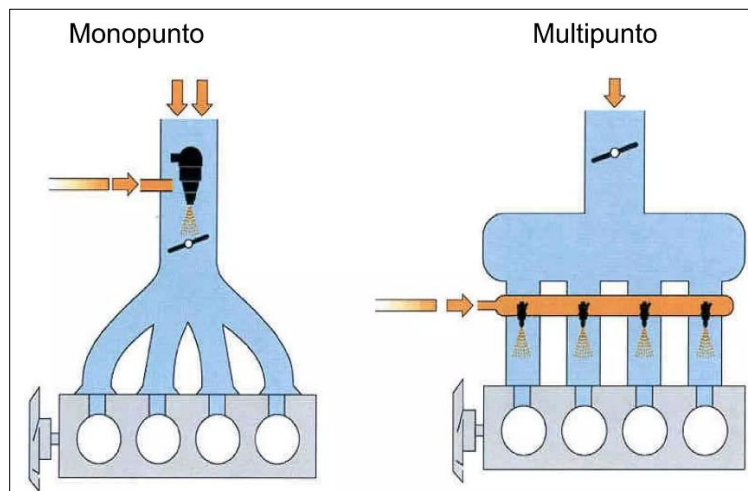


Figura 19 Inyección según la cantidad de inyectores. Fuente: [29]

3.3.3. Inyectores

Los sistemas electrónicos de inyección de gasolina desarrollados hasta ahora no son apropiados para emplear hidrógeno. Esto se debe a las grandes cantidades de combustible que deben ser inyectadas en un motor que funciona a base de hidrógeno, consecuencia de la baja densidad energética propia de este gas. Por este motivo, se han diseñado inyectores de combustible de diseño especial para adaptarse al gas natural, y algunos incluso han sido específicamente creados para el hidrógeno.

Las propiedades poco lubricantes del hidrógeno podrían ocasionar un rápido deterioro de las superficies presentes en un inyector convencional, en cuestión de minutos. Por esta razón, es necesario realizar ciertas modificaciones en las partes del sistema de inyección que están en contacto directo con el combustible. Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno se almacena a alta presión (700 bar), en un inyector convencional podría haber fugas de combustible, lo que conlleva la necesidad de emplear inyectores de alta presión.

Los desafíos principales que deben superarse en el uso del hidrógeno como combustible en motores de combustión interna son sus propiedades no lubricantes, baja energía de ignición y alta presión de almacenamiento. El hidrógeno puede causar un desgaste acelerado en las piezas del motor debido a estas características, por lo que es necesario realizar adaptaciones en las superficies de las partes que entran en contacto con este combustible para garantizar un funcionamiento adecuado.

En el mercado actual ya se encuentran disponibles inyectores especialmente designados para operar con hidrógeno. En México, existe la capacidad de desarrollar tecnología orientada a la fabricación de estos inyectores que permitiría impulsar la adopción y el avance en la utilización del hidrógeno como combustible alternativo. Esta capacidad de desarrollo tecnológico en México podría contribuir significativamente al desarrollo de soluciones sostenibles para la movilidad y la energía, abriendo nuevas oportunidades en la industria y promoviendo la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

3.4. Sistemas de enfriamiento

El sistema de enfriamiento desempeña un papel fundamental en los motores de combustión interna al controlar la temperatura del motor y evitar situaciones de sobrecalentamiento. Estos motores generan una notable cantidad de calor en el proceso de combustión. Si este calor no se elimina eficazmente, existe el riesgo de perjudicar el funcionamiento del motor y disminuir su eficacia. En este contexto, el sistema de enfriamiento tiene la responsabilidad de mantener la temperatura adecuada del motor, asegurando así su operación óptima.

En los vehículos, se pueden identificar dos categorías de sistemas de enfriamiento que tienen la función de regular la temperatura óptima del motor. Estos sistemas pueden diferenciarse en términos de su estructura y su modo de funcionamiento. La configuración del sistema de enfriamiento debe adecuarse al tipo de líquido refrigerante empleado y, en consecuencia, los sistemas de enfriamiento más comunes se clasifican en:

- Enfriamiento por líquido
- Enfriamiento por aire

Como ya vimos, los motores diésel y de gasolina tienen algunas diferencias en sus métodos de enfriamiento debido a las características particulares de cada tipo de motor y su proceso de combustión. A continuación, se presentan algunas diferencias clave en los métodos de enfriamiento entre estos dos tipos de motores:

1. Relación de compresión:

Motor diésel: Tienen una relación de compresión mucho más alta en comparación con los motores de gasolina. Esto significa que la mezcla aire-combustible se comprime mucho más antes de la ignición. Como resultado, generan más calor durante la combustión.

Motor de gasolina: Tienen una relación de compresión más baja, lo que resulta en una generación de calor menor durante la combustión en comparación con los motores diésel.

2. Temperatura de combustión:

Motor diésel: Debido a la alta relación de compresión, las temperaturas de combustión son significativamente más altas. Esto puede llevar a una mayor producción de calor y emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x).

Motor de gasolina: Las temperaturas de combustión son más bajas en comparación con los motores diésel.

3. Diseño del sistema:

Motor diésel: Dado que generan más calor y tienen temperaturas de combustión más altas, a menudo requieren sistemas de enfriamiento más robustos y eficientes para controlar la temperatura.

Motor de gasolina: Debido a temperaturas de combustión más bajas, pueden tener sistemas de enfriamiento menos complejos en algunos casos.

Debido a las diferencias en la relación de compresión, eficiencia térmica y temperaturas de combustión, los motores diésel tienden a generar más calor y requieren sistemas de enfriamiento más robustos en comparación con los motores de gasolina. Sin embargo, las necesidades de enfriamiento específicas pueden variar según el diseño y las aplicaciones individuales de los motores.

3.4.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor afecta el desempeño, eficiencia y emisiones del motor, sin embargo, se ha trabajado experimentalmente con motores para establecer las distribuciones de temperaturas en determinadas regiones de la cámara de combustión con el fin de comprender mejor los patrones de calor dentro del motor y cómo estos afectan su funcionamiento. Además, en la actualidad, el uso de software nos ayuda a simular y predecir con precisión cómo se comportarán los patrones de temperatura en diferentes condiciones operativas.

Estos programas de simulación, conocidos como simulación computacional fluidodinámica (CFD), permiten crear modelos virtuales detallados de la cámara de combustión y de todo el sistema del motor. Utilizando ecuaciones matemáticas que describen el flujo de fluidos y el calor, estos programas pueden predecir cómo el calor se dispersará en la cámara de

combustión en función de diversos parámetros, como la velocidad del flujo de aire, la inyección de combustible y la geometría de la cámara. Así mismo, estos estudios permiten identificar zonas con temperaturas excesivamente altas o bajas, lo que a su vez ayuda a optimizar el diseño del motor y el sistema de enfriamiento.

Las investigaciones realizadas desempeñan un papel fundamental al proporcionar un respaldo sólido para la toma de decisiones sobre las técnicas y estrategias más efectivas para enfriar motores de hidrógeno y prevenir el riesgo de sobrecalentamiento, ya que debido a las propiedades del hidrogeno, puede haber combustión a condiciones muy diversas, además el calor de combustión en el hidrógeno es mayor que en la gasolina y el gas natural, lo cual se refleja en el aumento de temperatura en los alrededores de la cámara de combustión.

La liberación de calor del hidrógeno es más alta que la de otros combustibles porque el proceso de combustión se completa en un periodo más corto, por la alta velocidad de la flama. En vehículos que utilizan hidrógeno como combustible, este se almacena en estado líquido y se inyecta en forma gaseosa. Para llevar a cabo este proceso, se requiere de un depósito criogénico que sea capaz de mantener el hidrógeno en este estado a una temperatura de alrededor de 20 K.

La característica sobresaliente del hidrógeno es su densidad energética superior, la cual excede la de la gasolina. Adicionalmente, este combustible ofrece ventajas en términos de enfriamiento del motor. La temperatura baja a la que el combustible es inyectado, a pesar de que ya se encuentra en estado gaseoso, puede prevenir un incremento excesivo de temperatura en áreas específicas del motor, como la bujía, los inyectores y ciertas regiones de la cámara de combustión.

3.5. Discusión y análisis.

El uso de hidrógeno en motores de combustión interna implica una serie de adaptaciones y mejoras en los diferentes sistemas de los vehículos. Para aprovechar al máximo este recurso energético limpio y eficiente, se necesitan una serie de ajustes y desarrollos tecnológicos clave.

En primer lugar, es esencial la incorporación de un tanque de almacenamiento de hidrógeno especialmente diseñado y seguro. Dado que el hidrógeno es altamente inflamable, el tanque debe cumplir con rigurosos estándares de seguridad para evitar fugas y garantizar la integridad del sistema y de los usuarios.

Además, se requiere una optimización de los sistemas de inyección de combustible, recordemos que los motores de combustión interna tradicionales están diseñados principalmente para utilizar combustibles fósiles, como la gasolina o el diésel, por lo que los inyectores deben adaptarse para manejar eficazmente el hidrógeno. Esto implica ajustes en la presión de inyección, la relación aire-combustible y el control de la ignición.

Otro desafío importante es el desarrollo de sistemas de enfriamiento altamente eficientes. El hidrógeno tiende a generar temperaturas más altas durante la combustión en comparación con los combustibles tradicionales, lo que puede provocar problemas de sobrecalentamiento. Por lo tanto, se deben diseñar sistemas de enfriamiento avanzados que mantengan el motor dentro de rangos de temperatura seguros y permitan un funcionamiento óptimo.

Además de estas modificaciones técnicas, es fundamental considerar la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Esto incluye la creación de estaciones de servicio que suministren hidrógeno de manera segura y eficiente, así como la promoción de políticas de apoyo y regulaciones para fomentar la adopción de esta tecnología.

Como sabemos, los motores de combustión interna requieren de lubricantes para su funcionamiento adecuado. Sin embargo, este aspecto presenta un desafío cuando se considera la adopción de hidrógeno como combustible. En estos motores, parte del aceite utilizado en la lubricación puede filtrarse en la cámara de combustión, lo que nos lleva a un problema similar al que se enfrentan los motores que utilizan combustibles sintéticos. Este fenómeno puede dar lugar a la emisión de contaminantes adicionales, aunque es importante destacar que estas emisiones no son mayores que las producidas por un vehículo tradicional.

Afortunadamente, los sistemas de control de emisiones actuales están diseñados para abordar y mitigar este problema. Los convertidores catalíticos y los sistemas de poscombustión están diseñados para capturar y eliminar los contaminantes del escape, incluidos los provenientes

de la quema de aceite lubricante. Por lo tanto, si bien existe la preocupación inicial de que el hidrógeno pueda agravar las emisiones debido a la filtración de aceite, en la práctica, estos sistemas de control de emisiones pueden abordar eficazmente esta cuestión. Es importante reconocer que este pequeño inconveniente puede dificultar la adopción generalizada de vehículos de hidrógeno.

3.6. Situación actual en el mercado.

A pesar de las investigaciones y experimentos a lo largo de la historia sobre el uso de hidrógeno como combustible en motores de combustión interna, es importante señalar que, hasta la fecha, no hemos visto una adopción generalizada de esta tecnología en el mercado. Sin embargo, se ha dado un paso significativo en esta dirección con la introducción del Toyota Corolla con motor térmico alimentado por hidrógeno.

Este modelo en particular, el Toyota Corolla Sport (ver figura 20), representa un avance en la exploración de esta tecnología. Este vehículo está equipado con un motor de 1.6 litros, tres cilindros en línea y un turbocompresor, al que se le han realizado adaptaciones en el sistema de suministro y de inyección. Estas modificaciones permiten que el motor funcione de manera eficiente y segura con hidrógeno como fuente de energía.



Figura 20 Toyota Corolla Sport de hidrógeno. Fuente: [30]

Es importante destacar que, al menos por el momento, este tipo de motorización podría tener aplicaciones más específicas y no necesariamente estar disponible para el público en general. Por ejemplo, vehículos como el Toyota Corolla con motor de hidrógeno podrían encontrar un nicho en competencias automovilísticas de alto rendimiento, como las 24 horas de Fuji. En estas circunstancias, la eficiencia y la potencia del hidrógeno podrían ser especialmente útiles para lograr un rendimiento excepcional en carreras de larga duración. [31]

A pesar de que todavía enfrentamos desafíos en términos de infraestructura y aceptación generalizada, la introducción de vehículos como el Toyota Corolla con motor de hidrógeno representa un paso importante en la evolución de la tecnología de propulsión y nos brinda una visión del potencial que tiene el hidrógeno como combustible en el ámbito automovilístico.

CAPÍTULO IV

EL HIDRÓGENO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

Después de examinar el uso del hidrógeno como combustible directo en motores de combustión interna, en ese capítulo nos centraremos en su aplicación en vehículos eléctricos equipados con celdas de combustible. Comenzaremos con una visión histórica del desarrollo de estas celdas, explorando sus orígenes y su evolución. Posteriormente, discutiremos los diferentes tipos de celdas de combustible y sus características distintivas. Finalmente, presentaremos una sección de vehículos que actualmente están disponibles en el mercado y que incorporan esta tecnología.

Otra forma prometedora de utilizar el hidrógeno como combustible en automoción es a través de las celdas de combustible. Estas celdas tienen la capacidad de almacenar la energía eléctrica generada en una batería, o suministrarla directamente a un motor eléctrico. El motor eléctrico, a su vez, transmite el par necesario a las ruedas para propulsar el vehículo y permitir su avance. Esta tecnología ofrece varias ventajas significativas sobre los motores de combustión interna tradicionales y las baterías convencionales utilizadas en los vehículos eléctricos.

Las celdas de combustible son semejantes a las baterías, en términos de sus partes y de cómo generan electricidad; la diferencia es que las celdas de combustible no requieren ser recargadas. Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte en electricidad la energía química de un combustible que recibe del exterior. Por lo general, este combustible es hidrógeno y es capaz de suministrar energía eléctrica de manera continua mientras se mantenga el suministro de este combustible y no falte oxidante en el cátodo, que normalmente es oxígeno, y dada su disponibilidad en el aire, no es necesario almacenarlo.

Otra distinción entre una batería normal y una celda de combustible es que las baterías tienen todo su combustible y oxidante almacenado en la batería sellada, mientras que una celda de

combustible tiene canales abiertos a través de los cuales fluyen el combustible (a menudo hidrógeno) y el oxidante (aire). [32]

A diferencia de los procesos de combustión, que convierten la energía química del combustible en energía térmica, una celda de combustible tiene como propósito lograr una conversión directa de la energía química en eléctrica, dicha transformación la realiza sin recurrir a un ciclo termodinámico, por lo que no está sujeta al límite de Carnot. [11] Sin embargo, la degradación, la corrosión o el mal funcionamiento de sus componentes, limita el régimen de operación de las celdas de combustible en la práctica.

Los componentes básicos de una celda de combustible son: dos electrodos porosos, un electrodo negativo o ánodo y un electrodo positivo o cátodo, en contacto con una capa de electrolito (líquido o sólido). En la figura 21 se representa esquemáticamente una celda de combustible con los gases remanentes actuando como productos y se muestran las direcciones del flujo de iones a través de la celda.

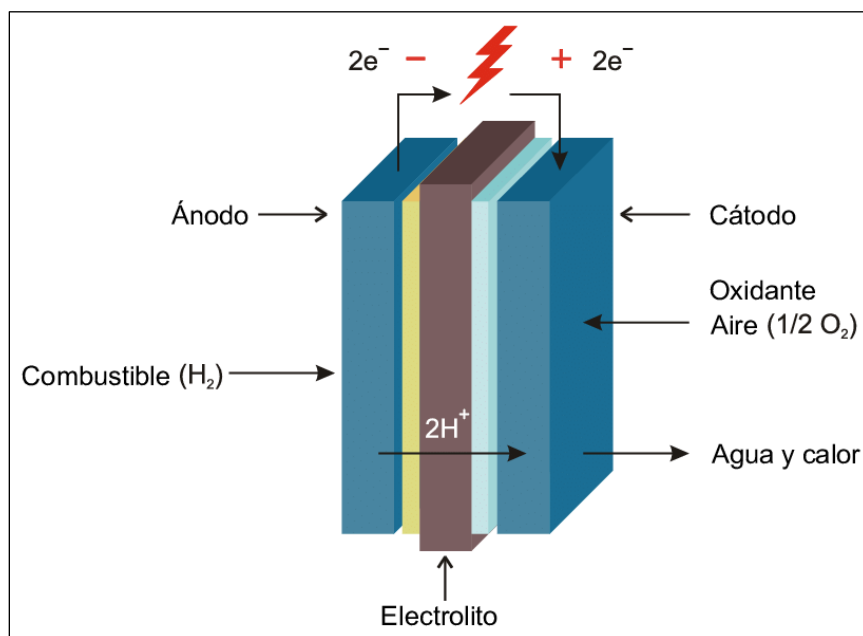


Figura 21 Esquema de una celda de combustible genérica. Fuente: [9]

La mayoría de las pilas de combustible, también conocidas como células o celdas de combustible (*fuel cell*, en inglés), son en realidad, una suma de pilas individuales. El núcleo de cada celda está compuesto por el electrolito y los dos electrodos (*Membrane Electrode Assembly, MEA*), este se encuentra comprimido entre dos placas, que además de servir como protección, las placas también sirven para canalizar y distribuir los gases en los electrodos, además de conducir electrones y, en muchos casos, facilitan la conexión en serie de celdas individuales. El conjunto de celdas conectadas en serie por medio de estas placas bipolares constituye la pila de combustible (*stack*), en cuyos extremos se sitúan dos placas terminales, que actúan como terminales eléctricos. [33] En la figura 22 podemos observar esquemáticamente cada uno de los componentes de una celda de combustible.

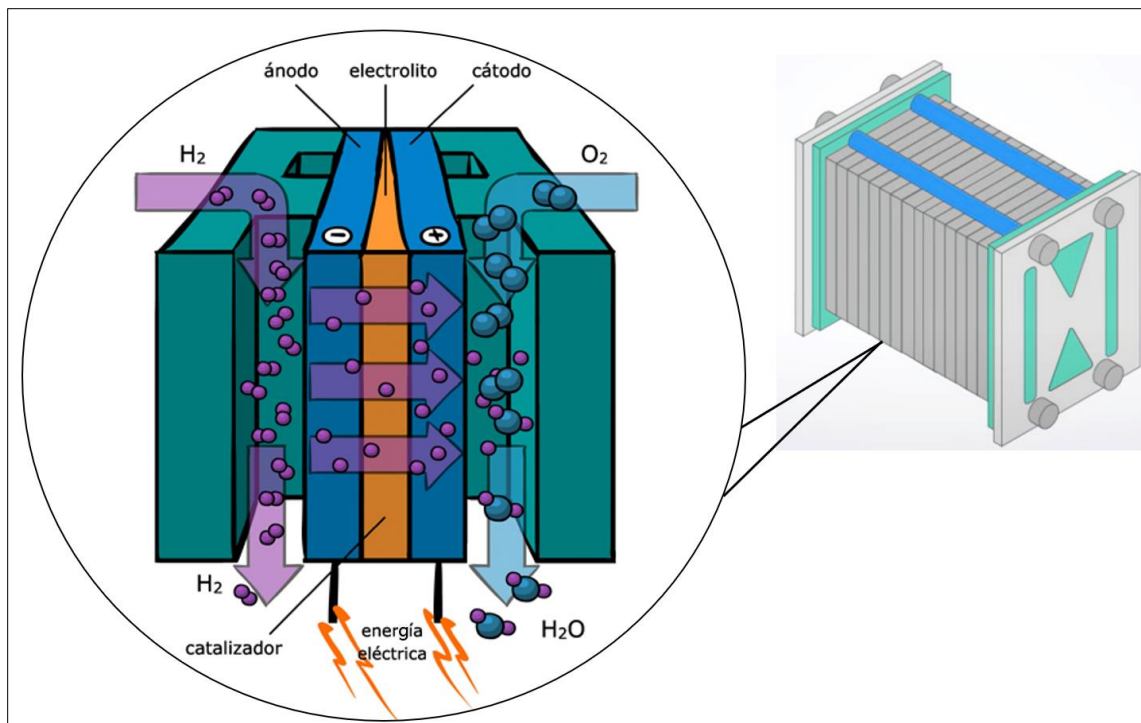


Figura 22 Componentes internos de una celda de combustible. Fuente: [50]

4.1. Historia de las celdas de combustible

El principio de la celda de combustible fue descubierto en Suiza por el científico Christian Friedrich Schönbein en 1838. Gracias a este trabajo, el físico William Grove creó la primera celda de combustible en 1842. Produjo energía eléctrica con cuatro celdas simples, (ver figura 23), utilizando hidrógeno y oxígeno, elementos que se siguen utilizando en las celdas de combustible de ácido fosfórico en la actualidad.

Los experimentos de Grove se basaron en la teoría de que, al pasar una corriente eléctrica a través del agua, esta se divide en hidrógeno y oxígeno. Después de una serie de experimentos, Grove combinó hidrógeno y oxígeno para producir electricidad y agua, siendo estos elementos base de una celda de combustible simple. Grove presentó dos modelos representativos del prototipo de celdas de combustible de ácido fosfórico (PAF) y el segundo modelo de celda es la predecesora de las celdas modernas. [34]

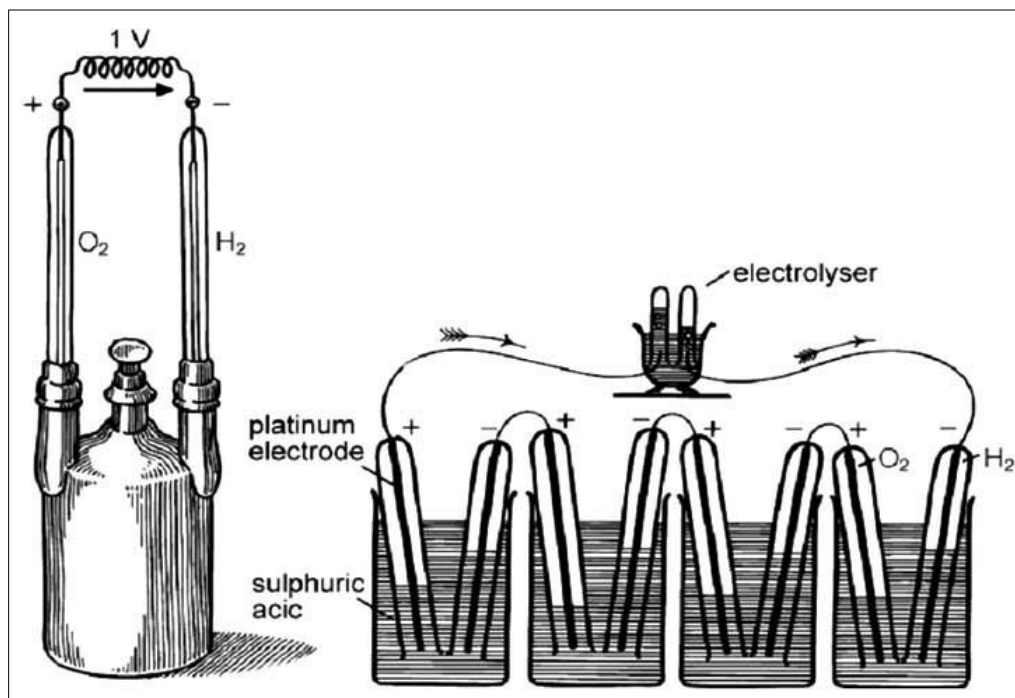


Figura 23 Configuración del dispositivo de Grove. Fuente: [35]

Sin embargo, este descubrimiento fue solo una curiosidad científica y no tuvo ningún uso práctico, debido a que la batería de Grove usaba ácidos fuertes concentrados que eran peligrosos de manejar, corrosivos y tóxicos. Posteriormente se establecieron las bases para las pilas de combustible de alta temperatura, alcalinas, etc., desarrolladas por Varta, Nerts, Baur, entre otros. [36]

Hasta este momento, el fenómeno de la conducción eléctrica no estaba completamente comprendido. Sin embargo, se tenía claro, que las disoluciones acuosas iónicas conducían grandes entidades llamadas iones y, que los metales conducían de acuerdo con la ley de Ohm. No fue hasta el año de 1893 en el que Ostwald determinó experimentalmente la función de los diferentes componentes de una celda de combustible como son electrodos, electrolito y, agentes reductores y oxidantes, lo cual ayudo a aclarar este panorama.

Fue hasta principios de la década de 1960, que los químicos Leonard Niedrach y Thomas Grubb, que trabajaban para General Electric Company, inventaron la primera tecnología de membrana de intercambio de protones, con la que se logró crear la celda de combustible con membrana de intercambio protónico (PEMFC) y se convirtió en una curiosidad industrial con posibles aplicaciones.

El primer uso de gran alcance fue el desarrollo de la pila de combustible alcalina para las misiones espaciales (ver figura 24), con el proyecto Apollo se daría un importante paso adelante tras el proyecto Gemini (en el que se utilizaron sin éxito celdas de combustible poliméricas). La compañía fabricante de aviones Pratt & Whitney, fundada en 1925, adquirió las patentes de Bacon como parte del contrato de la NASA para este proyecto. La NASA eligió las celdas de combustible alcalinas debido a que tienen una eficiencia del 70%. Los programas espaciales soviéticos (SOYUZ), y más tarde, el programa BURAN de la Agencia Rusa del Espacio también emplearon esta tecnología. [37]



Figura 24 Científicos de la NASA trabajando en uno de los stacks de la nave Apollo 1964. Fuente: [37]

Otro desarrollo significativo fue la creación de las membranas de Nafion^{TM*} por parte de DuPont en 1970, lo cual abrió el camino para la introducción de las baterías poliméricas (PEMFC). En la década de 1970 y principios de la de 1980, el desarrollo práctico de las baterías experimentó una serie de avances considerables. Por ejemplo, las baterías de cerámica evolucionaron de su tradicional configuración plana, (figura 25 a), que usaba electrolitos extremadamente espesos, a nuevas configuraciones como las tubulares, (figura 25 b), empleando la idea de un electrolito de capa delgada para mejorar el rendimiento de la batería.

* Las membranas Nafion son ampliamente utilizadas en celdas electroquímicas, funcionan como electrolitos sólidos que conducen los cationes.

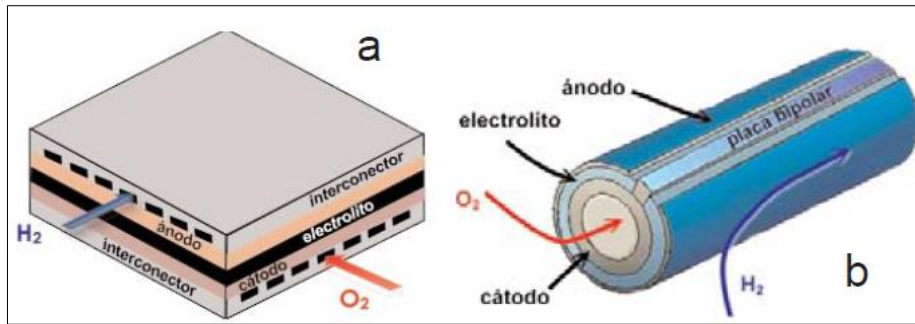


Figura 25 Configuración básica de una pila (a) planar y (b) tubular. Fuente: [38]

El primer autobús propulsado por celdas de combustible fue desarrollado por la empresa canadiense Ballard en 1993, fue el legado de estos grandes avances. Actualmente los fabricantes de automóviles más grandes del mundo están trabajando en la optimización de esta tecnología en busca de su comercialización. [38]

4.2. Tipos de celdas de combustible

Aunque el funcionamiento de todas las celdas de combustible responde al mismo principio fundamental, entre ellas existen notables diferencias de diseño, características de operación y potencia. La clasificación habitual de las pilas de combustible está basada en el tipo de electrolito que utilizan, que puede ser una solución acuosa acida o básica, un polímero bien hidratado con numerosos nano canales por los que circulan iones hidrógeno (H^+) o iones hidróxido (OH^-), o un cerámico. La temperatura y la presión de funcionamiento de la celda, así como las propiedades de los materiales utilizados en los demás componentes, están determinadas por las propiedades del electrolito, ya que este determina características fundamentales de la pila, y, en consecuencia, sus posibles campos de aplicación. En las celdas de combustible de alta temperatura se pueden utilizar otros combustibles además de hidrógeno. Algunas de estas celdas están disponibles comercialmente para los usuarios especializados.

Actualmente, existen 6 tipos de celdas de combustible en distintos estados de desarrollo; en esta sección, se discutirán los rasgos clave que caracterizan a cada uno de ellos.

4.2.1. PEMFC

Las Pilas de Membrana Polimérica (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), también denominadas de Membrana de Intercambio de Protones (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) son un tipo de celda de combustible que ofrece una alta densidad de energía y la ventaja de ser ligera, además de ser más compactas que las demás celdas de combustible.

La figura 26 muestra un esquema de una celda de combustible PEMFC; a diferencia de una batería convencional, el dispositivo recibe su combustible y oxidante de fuentes externas. La batería se puede utilizar hasta que se haya consumido todo el combustible u oxidante.

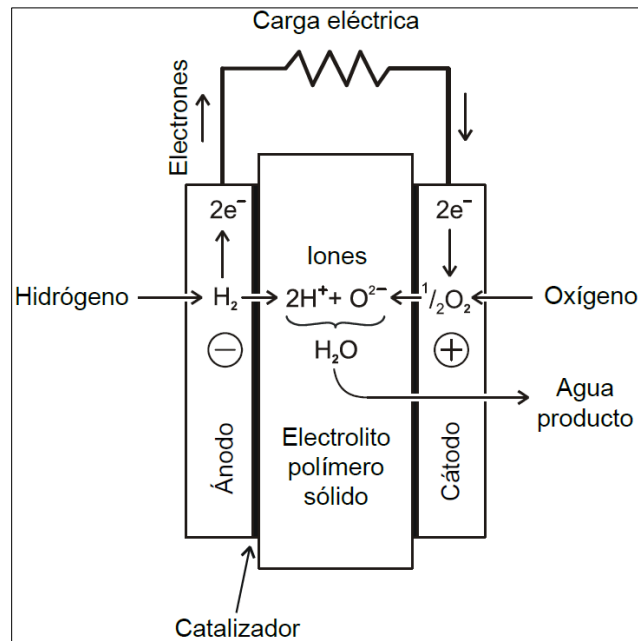
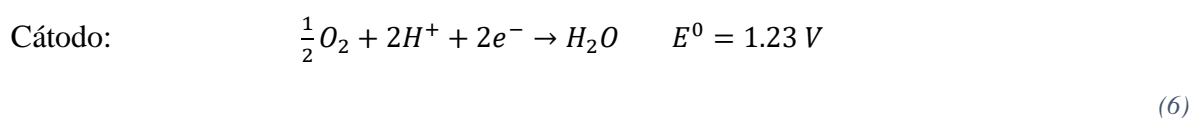
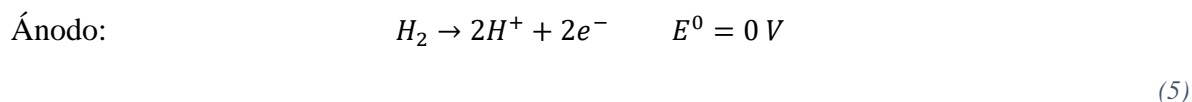


Figura 26 Celda de combustible PEM. Fuente: [9]

Las PEM utilizan como electrolito electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino junto con una membrana delgada y sólida hecha de un polímero de ácido sulfónico fluorado u otros polímeros similares. Necesitan hidrógeno, oxígeno y agua, pero no necesitan fluidos corrosivos como otras celdas de combustible, por lo general,

utilizan como combustible hidrógeno puro que se mantiene en tanques o convertidores incorporados.

Los protones generados en el ánodo atraviesan el electrolito sólido de membrana hasta el cátodo, donde se combinan con el oxígeno para formar agua. En las ecuaciones 5 y 6 se presentan las reacciones que ocurren en los electrodos de una celda PEMFC, donde E^0 es el potencial estándar para cada semirreacción. [9]



La potencia de salida de la celda depende de las propiedades de los materiales, el diseño y de la estructura de la celda, su funcionamiento y condiciones de operación. Para que una celda de combustible de tipo PEMFC funcione con su máxima eficiencia, requiere un mantenimiento óptimo de la temperatura, la hidratación de la membrana, y la presión parcial de los reactivos a través de la membrana.

Las PEMFC operan a temperaturas relativamente bajas (50–100 °C), obteniéndose rendimientos de 40-50% [38], en comparación con otras celdas de combustible, pueden arrancar rápidamente y requieren menos tiempo de calentamiento porque ofrecen altas densidades de corriente y tiempos de respuesta rápidos. Esto puede tener el beneficio de reducir el desgaste de los componentes del sistema y prolongar su vida útil. Por el contrario, el calor residual no suele ser aprovechable para cogeneración u otro fin energético útil. Las bajas temperaturas de este tipo de celdas de combustible hacen que la cinética de las reacciones electroquímicas sea más difícil, esto conlleva a que sea necesario utilizar materiales electrolizadores. La mayoría de los materiales utilizados suelen ser metales preciosos como el platino o el rutenio, lo que eleva el precio de la pila. Además, el combustible solo puede ser hidrógeno de alta pureza; si se quisiera usar cualquier otro combustible, como gasolina, gas natural, etc., este tendría que pasar por una etapa previa de reformado para producir hidrogeno. [11]

Gracias a su flexibilidad y versatilidad, las celdas de combustible PEMFC son vistas como el principal candidato de tecnología de celdas de combustible de ligeras aplicaciones de transporte e instalaciones estacionarias. [39] Debido a su rapidez para el arranque, baja sensibilidad a la orientación, y su relación favorable entre peso y energía producida. Para aplicaciones de energía estacionaria, también son usadas en los sistemas de menor escala, como distribuidores de electricidad y para generación de calor en los edificios y las casas individuales.

4.2.2. AFC

Las pilas de combustible alcalinas (AFC del inglés *Alkaline Fuel Cells*), fueron inventadas por Francis Thomas Bacon en 1932; siendo una de las primeras tecnologías de pilas de combustible desarrolladas y el primer tipo usado ampliamente en los años 60 y 70 en programas de la NASA como el programa Apolo, utilizadas principalmente para suministrar energía eléctrica a equipos de las naves y agua pura. Desde entonces, se han desarrollado hasta el punto en que ahora son una tecnología lo suficientemente avanzada como para ser utilizada en aplicaciones aeroespaciales; hoy día se emplean para suministrar potencia a bordo del transbordador espacial (*Space Shuttle Orbiter*). [39]

Estas celdas de combustible utilizan como electrolito el hidróxido de potasio (KOH), el cual es una solución con una concentración del 85% en peso, [38] soportada generalmente en asbesto. Se emplea KOH debido a que tiene la más alta conductividad entre los hidróxidos alcalinos. El electrolito está contenido en una matriz de manera que le permite pasar, pero impide el paso de los electrones. Pueden utilizar una variedad de metales no preciosos como catalizador en el ánodo, mientras que en el cátodo se utiliza principalmente el platino. En la figura 27 se muestra esquemáticamente la celda de tipo AFC.

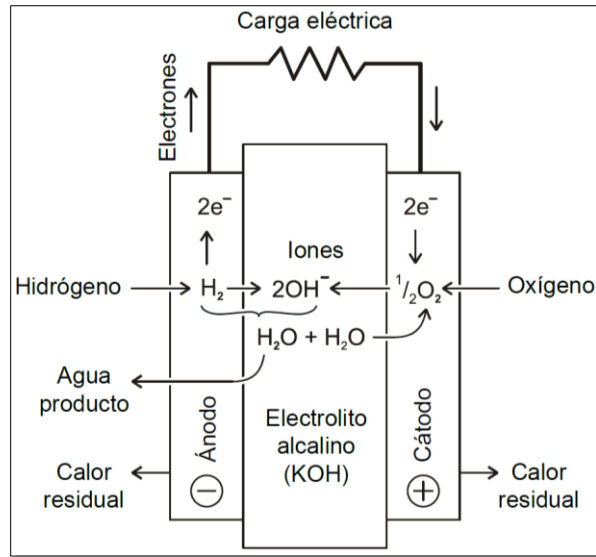
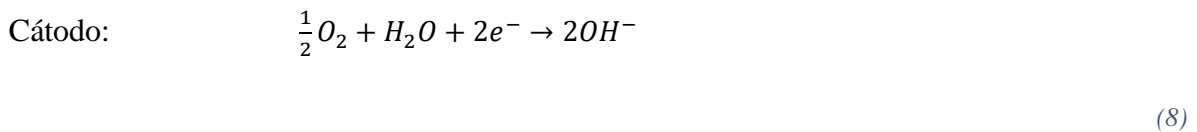
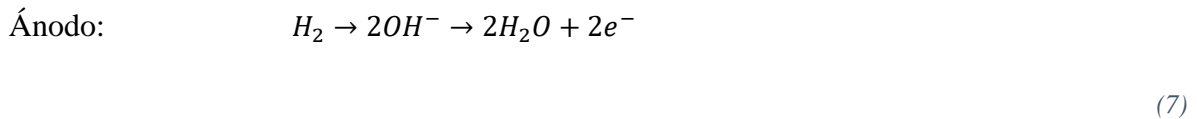


Figura 27 Celda de combustible tipo AFC. Fuente: [9]

Las pilas AFC habitualmente operan a temperaturas comprendidas entre 65 y 220 °C [9], son pilas que funcionan según los fundamentos de las pilas de combustible básicas o alcalinas, donde la reacción se produce gracias a los grupos hidroxilos (que son los que se trasladan por el electrolito). En este tipo de celda el hidrógeno sirve como combustible y el aire como oxidante. Pueden generar energía con eficiencias superiores al 50% debido en parte a la velocidad a la que transcurren las reacciones que se producen en este tipo de celdas, además tienen un alto rendimiento, lo que las convierte en las pilas de combustible más asequibles de producir. En los electrodos de una AFC se producen las siguientes reacciones (ecuaciones 7 y 8), en las que los iones hidroxilo generados se transfieren del cátodo al ánodo a través del electrolito:



El principal inconveniente en ese tipo de celdas de combustible es su enorme sensibilidad a la contaminación por dióxido de carbono (CO₂). Es fundamental utilizar el hidrógeno y

oxígeno de alta pureza o aire purificado para que la celda funcione correctamente, ya que incluso una pequeña cantidad de CO_2 en el aire puede afectar el funcionamiento de la celda y provocar una pérdida de eficiencia (debido a la reducción de la concentración del electrolito). El proceso de purificación supone un incremento en el costo de la celda. La vida útil de la pila también se ve afectada por la susceptibilidad a este tipo de contaminación.

4.2.3. PAFC

La Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*, PAFC), fue la primera tecnología de celda de combustible que se comercializó. Se considera la primera generación de pilas de combustible modernas, además es uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados y el más usado en la actualidad.

Estas pilas utilizan ácido fosfórico (H_3PO_4) líquido concentrado al 100% como electrolito, por ser el único ácido inorgánico común con baja volatilidad y alta estabilidad y que es tolerante a la presencia de dióxido de carbono. En la figura 28 podemos observar a detalle los principales componentes de este tipo de celda de combustible. El carburo de silicio se utiliza como matriz para fijar el ácido, y el platino sirve como catalizador tanto en el ánodo como en el cátodo.

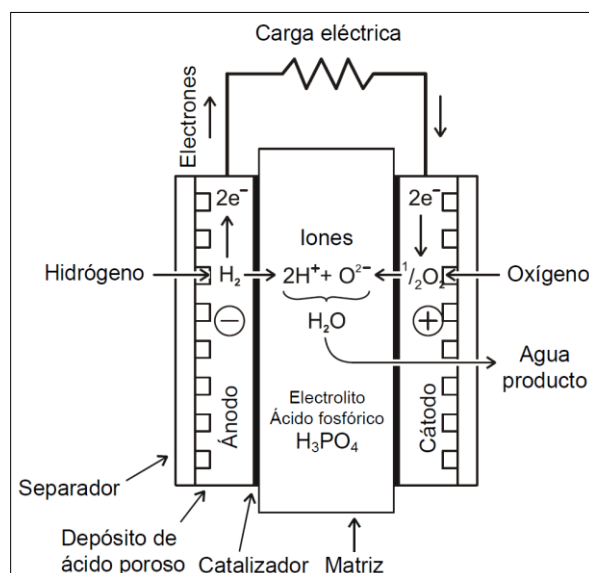


Figura 28 Celda de combustible PAFC. Fuente: [9]

Este tipo de celdas operan a temperaturas comprendidas entre 150 y 220 °C [39], siendo una de las principales ventajas ya que, altas temperaturas de funcionamiento suelen estar relacionadas con una buena cinética. A temperaturas más bajas, el ácido fosfórico es un mal conductor iónico, y el envenenamiento del catalizador de platino con monóxido de carbono (CO) llega a ser severo.

Las eficiencias pueden llegar hasta un 80% en el caso de cogeneración de energía eléctrica por vapor de agua, pero si sólo se considera la generación de electricidad tan sólo llegan del 36 al 45%. En comparación con las pilas de combustible de tipo AFC y PEMFC, el rango de potencia es mayor. Este tipo de celdas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, sin embargo, normalmente se usan en la generación de energía estacionaria. También se ha usado en vehículos pesados, como los autobuses urbanos.

El combustible utilizado es el hidrógeno, que puede provenir de procesos de reformado. El monóxido de carbono que puede contener la corriente de hidrógeno no supone un problema grave, se admite un 1.5% de CO, puesto que en un medio ácido no se forman carbonatos.

Las reacciones que tienen lugar son:



En el ánodo, el hidrógeno se oxida y origina protones y electrones, que son los que realizan el trabajo eléctrico útil. Los protones se difunden a través del electrolito líquido y alcanzan el cátodo, donde reacciona con oxígeno para formar agua. [9]

El principal inconveniente de este tipo de celdas de combustible es que producen menos energía que otras pilas de igual peso y volumen. Por este motivo, esas pilas normalmente presentan gran tamaño y peso. La corrosión provocada por el electrolito ácido es un problema que eleva el coste de los productos y restringe los materiales que se pueden utilizar. Otro problema es que hay pérdidas de electrolito y se tiene que reponer. Además, estas pilas necesitan un catalizador de platino, lo que eleva su costo.

4.2.4. MCFC

Las Pilas de Combustible de Carbonatos Fundidos (*Molten Carbonate Fuel Cell*, MCFC) se están desarrollando en la actualidad para centrales eléctricas de carbón en la producción de electricidad. Este tipo de celdas funcionan a altas temperaturas que oscilan desde los 600 y 700 °C, utilizan como electrolito una combinación de carbonatos alcalinos (litio, sodio y potasio) que se retiene en una matriz cerámica de aluminio de litio (LiAlO_2). Los electrodos generalmente son níquel (Ni) ánodo y óxido de níquel (NiO) cátodo y no requiere platino como catalizador, lo que abarata la fabricación. En la figura 29 se muestra un esquema de una celda de carbonatos fundidos.

La alta temperatura de funcionamiento es necesaria para alcanzar la conductividad suficiente del electrólito de carbonato, además a esas temperaturas los carbonatos alcalinos forman un eutéctico fundido. [38] Otra ventaja de la alta temperatura de operación es que permite una mayor flexibilidad de combustible, siendo posible reformar gas natural, alcoholes, gas de vertedero, gas sintético procedente del coque del petróleo, carbón, biomasa, para generar hidrógeno para la celda de combustible.

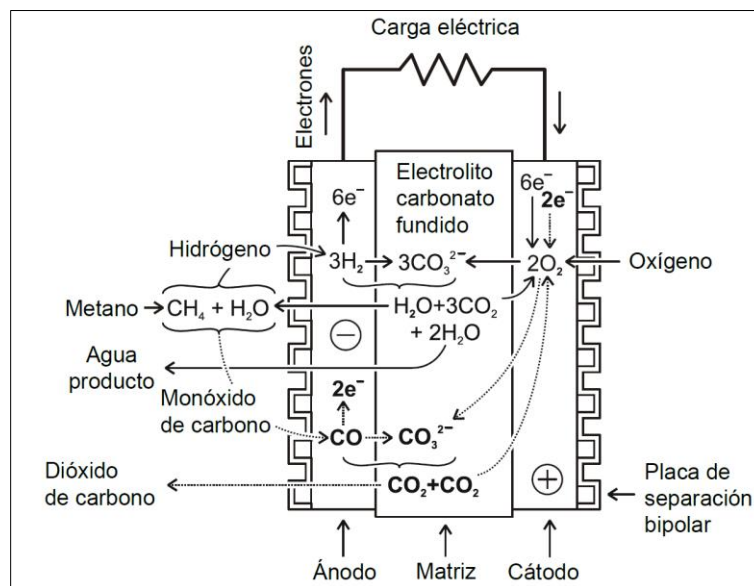
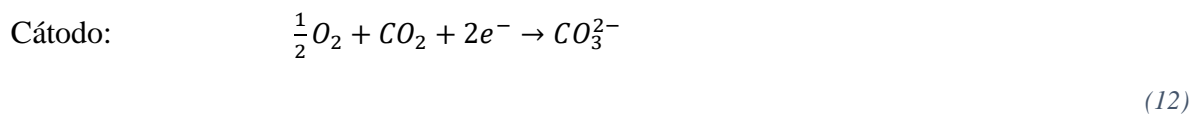
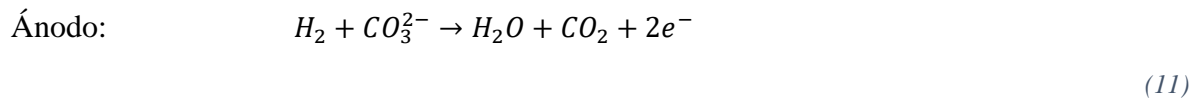


Figura 29 Esquema de una celda de combustible de carbonatos fundidos. Fuente: [9]

Este tipo de celdas son más eficientes comparadas con las otras celdas mencionadas anteriormente, pueden tener un rendimiento de aproximadamente el 60%. Cuando el calor que se desprende es captado y utilizado, el rendimiento total del combustible puede ser de hasta el 85%.

En el ánodo, el hidrógeno reacciona con los iones carbonato y produce agua y dióxido de carbono. Los iones carbonatos se regeneran en el cátodo mediante la reducción del oxígeno y posterior reacción con el dióxido de carbono. Los iones carbonato migran a través del electrolito del cátodo al ánodo y completan el circuito. Por su parte, el dióxido de carbono generado en el ánodo se recircula para ser utilizado en el cátodo. [9]



Ese tipo de pilas no requieren de reformador externo, para convertir los combustibles en hidrógeno, debido a las altas temperaturas a las que trabaja, estos combustibles pueden ser convertidos dentro de la pila, reduciendo costes. Usualmente el CO₂ producido en el ánodo es reciclado por un circuito externo hacia el cátodo, donde se consume. Las MCFC se utilizan en sistemas estacionarios de generación distribuida de potencia eléctrica y calor.

Las pilas de carbonato fundido no son propensas a la contaminación por monóxido o dióxido de carbono, lo que permite que se puedan usar en ellas como combustibles gases fabricados del carbón. Aunque son más resistentes a las impurezas que otros tipos de pilas, se están investigando actualmente en nuevas formas de hacer que la pila MCFC sea resistente a las impurezas procedentes del carbón, como pueden ser el sulfuro y las partículas.

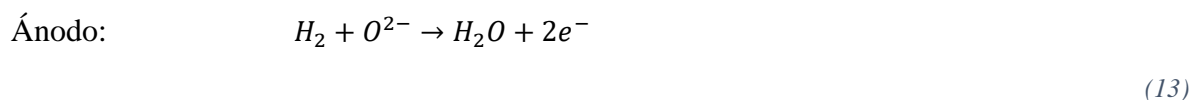
Este tipo de celdas presentan una serie de inconvenientes que se deben resolver si se quiere que su comercialización se lleve a cabo, por ejemplo, las altas temperaturas a las que operan estas pilas y el electrolito corrosivo que utilizan hacen que sus componentes se deterioren con suma facilidad, lo que reduce la vida útil de la pila. Los científicos están buscando materiales resistentes a la corrosión para fabricar los componentes. Además, la principal

limitación de estas celdas también incluye la necesidad de dos flujos, uno de CO y otro de O₂ en el cátodo y la formación de H₂O en el ánodo que pueda diluir el combustible.

4.2.5. SOFC

Las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (*Solid Oxide Fuel Cell*, SOFC), son unas de las que más atención investigadora han atraído en los últimos años, dado que son las celdas de combustible más desarrolladas después de las poliméricas. Este tipo de celdas utilizan como electrolito un material cerámico sólido y resistente con capacidad de conducción iónica, consistente en un óxido metálico no poroso, habitualmente óxido de circonio (ZrO₂) estabilizado con óxido de itrio (Y₂O₃). Los metales como el cobalto y el níquel se emplean con frecuencia como materiales de electrodos.

Las pilas de óxido sólido operan a temperaturas muy elevadas, alrededor de los 1000 °C, donde la conducción iónica por iones de oxígeno se lleva a cabo. Los iones de oxígeno (O²⁻) se transfieren desde el cátodo, donde se forman por reducción del oxígeno, hasta el ánodo, donde reaccionan con el hidrógeno para formar agua. Las semirreacciones son:



Son los dispositivos más eficientes, inventados para la conversión química de los combustibles directamente en energía eléctrica. Las elevadas temperaturas hacen que no sea necesario utilizar metales nobles como catalizadores, reduciendo el coste. También permite a la pila convertir los combustibles internamente, lo que permite el uso de diferentes combustibles y por tanto reduce el coste asociado que supone añadir un convertidor al sistema.

Al ser el electrolito un sólido, las pilas no se tienen que construir con una configuración laminar, como es el caso de otras pilas, por lo que las podemos encontrar en dos diferentes morfologías (planas, tubulares).

- **Planar:** Permite una conexión sencilla entre celdas. La captación de corriente en dirección perpendicular en un “*stack*” con configuración plana debe tener una mayor polarización óhmica que en la configuración tubular, y por tanto debe ser mayor el rendimiento global, por otro lado, el principal problema de esta configuración es el sellado de cada celda. Si éste no se realiza de forma adecuada puede producir el paso del reactante anódico al compartimento catódico.
- **Tubular:** Este tipo de diseño elimina el problema de un sellado defectuoso. El cátodo, la celda de interconexión, el electrolito y el ánodo se depositan por este orden sobre un soporte tubular poroso cerrado en un extremo de circonita estabilizada con calcio. El gas oxidante se introduce a través del tubo central de alúmina y el combustible se suministra por la cara exterior del tubo cerrado en un extremo, recorriendo ambos la celda en direcciones paralelas. En este tipo de diseño, las celdas son ordenadas a lo largo del soporte tubular y se conectan en serie por medio del material de interconexión cerámico. El rendimiento de esta configuración es inferior al de la configuración planar. [11]

La elevada temperatura de operación de estas celdas requiere un suministro constante de energía, lo que en principio supone una disminución de la eficiencia energética de la pila, a pesar de que la reacción electroquímica de la pila es exotérmica y libera una considerable cantidad de calor. No obstante, los gases de salida están también a temperaturas elevadas y pueden utilizarse para impulsar una turbina externa. El resultado es un sistema híbrido de cogeneración que permite alcanzar rendimientos conjuntos de hasta un 90 %. [9]

El rango de potencia de esta celda oscila entre (100 y 250 kW), lo que la hace adecuada para su uso en grandes sistemas estacionarios de alta potencia para la generación distribuida de calor y electricidad.

El principal inconveniente de estas celdas es que se inician lentamente debido a las altas temperaturas a las que operan y que requieren mucha protección para evitar que el calor se escape y proteger a los trabajadores, lo que puede no ser aceptable para todas las aplicaciones, por ejemplo, para dispositivos electrónicos portátiles o transporte. La durabilidad de los materiales también se ve afectada por las altas temperaturas, por lo que se deben poner limitaciones significativas en la elección de materiales para que sean altamente resistentes a

los ciclos térmicos durante los procesos de encendido y apagado. La solución al desafío tecnológico al que se enfrenta esta tecnología es la creación de materiales duraderos y económicos que puedan soportar las altas temperaturas a las que opera este tipo de pila.

4.2.6. DMFC

Las Pilas de Combustible de Metanol Directo (*Direct Metanol Fuel Cells*, DMFC), son una subcategoría de pilas de combustible de intercambio de protones (PEMFC) en las que se utiliza metanol como combustible. Las pilas directas del combustible de metanol son accionadas por el metanol puro, que se mezcla con vapor y se alimenta directamente en el ánodo de la célula de combustible. Se utiliza una membrana de polímero como electrolito. Los electrodos son de carbono recubiertos de platino.

Las pilas de combustible de metanol no tienen muchos de los problemas de almacenamiento de combustible típicos de algunas pilas de combustible, ya que el metanol tiene una densidad más alta que el hidrógeno. El metanol es también más fácil de transportar y de proveer al público usando la infraestructura actual ya que es un líquido, como la gasolina.

Las DMFC pertenecen a una familia de combustibles de baja temperatura, hasta 130 °C. [40] Estas celdas ofrecen una serie de ventajas sobre las celdas de hidrógeno, poseen facilidad de manejo, son económicas y convenientes, además poseen un rendimiento de electroquímica razonable, y no requieren de presión, en el gas o el hidrógeno. La capacidad de potencia de este tipo de celdas de combustible es favorable para el uso de la electrónica portátil alimentado por celdas de combustible en miniatura, por lo que generalmente son usadas en los equipos electrónicos en miniatura.

Las celdas de combustible de tipo PEMFC o DMFC algún día podrán sustituir las baterías de energía de los dispositivos electrónicos portátiles. Los principales inconvenientes de las baterías para estas aplicaciones son la capacidad limitada y recarga lenta, sin embargo, un sistema de celdas de combustible puede alcanzar una mayor potencia y capacidad de energía. Durante los últimos años han surgido versiones portátiles de las celdas de combustible, como es el caso de Toshiba que ha desarrollado un prototipo de celdas de combustible para un ordenador portátil. [39]

A continuación, en la tabla 5 se muestra a manera de resumen de las principales características de los diferentes tipos de celdas de combustible mencionados anteriormente.

Tabla 5 Características principales de las celdas de combustible. Fuente: Realizada por el autor basado en [36,38,39,41]

Celda de combustible	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Propiedad						
Electrolito	Polímero	Hidróxido de potasio (KOH)	Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	Carbonato fundido	Óxido sólido (cerámico)	Membrana polimérica
Combustible	- Hidrógeno (H ₂) - Metanol (CH ₃ OH)	Hidrógeno (H ₂)	- Hidrógeno (H ₂) - Monóxido de carbono (CO)	- Hidrógeno (H ₂) - Monóxido de carbono (CO)	- Hidrógeno (H ₂) - Monóxido de carbono (CO)	Metanol
Temperatura de operación (°C)	50 – 100	65 – 220	150 – 220	600 – 700	800 – 1000	50 – 130
Eficiencia	40 – 50%	> 50%	40 – 80%	60 – 80%	65 – 85%	45 – 55%
Aplicaciones	- Transporte - Generación de energía portátil	- Vehículos espaciales - Uso militar	- Transporte - Generación de energía estacionaria	- Generación distribuida de potencia eléctrica estacionaria.	- Generación eléctrica estacionaria	- Portátiles - Equipos electrónicos - Transporte
Ventajas	- Baja temperatura - Arranque rápido - Baja corrosión	- Reacción catódica rápida - Alto rendimiento	- Puede usar H ₂ no puro - Alta eficiencia (cogeneración)	- Alta eficiencia - Flexibilidad de combustibles	- Catalizadores baratos - Reduce la corrosión	- Fácil producción y alimentación del combustible
Desventajas	- Alta pureza de combustible - Catalizador caro	- Reactivos caros - Requiere gases sin CO ₂	- Electrolito corrosivo - Peso y tamaño elevado	- Altas temperaturas - Aumento de corrosión	- Arranque lento - Difícil manejo de materiales	- Baja eficiencia - Producción de CO ₂

4.3. Curva de polarización

La curva característica que se usa para definir las prestaciones de una pila de combustible se denomina curva de polarización. La curva de polarización es una representación gráfica que muestra cómo la tensión o voltaje de la pila de combustible varía en función de la densidad de corriente que fluye a través de ella. Las curvas de polarización

son una herramienta importante para analizar el rendimiento y la eficiencia de las pilas de combustible, así como para comprender los fenómenos electroquímicos que ocurren en su interior. En la figura 30, se muestra gráficamente un ejemplo de una curva de polarización de una celda de combustible.

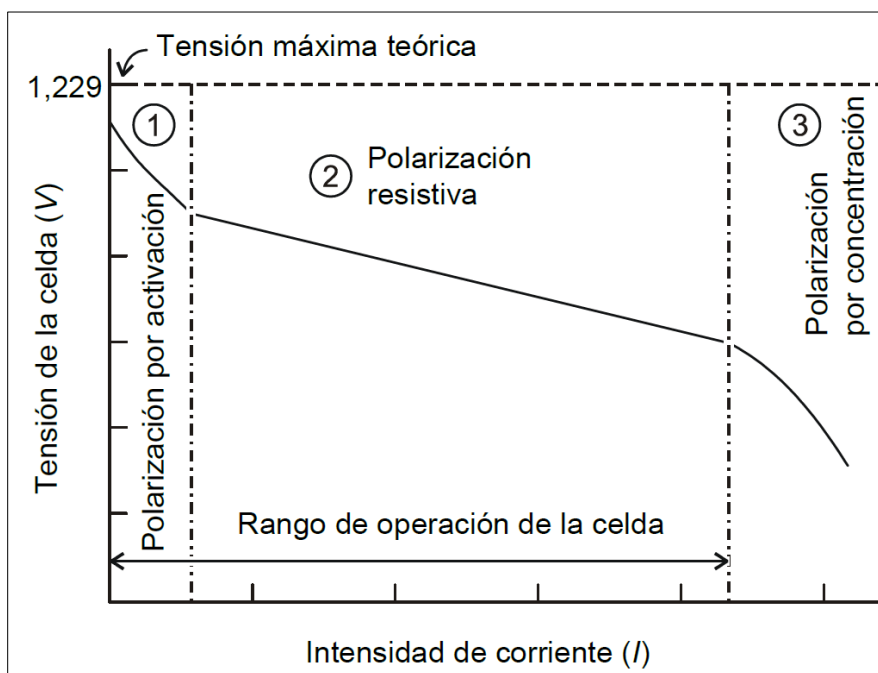


Figura 30 Curva de polarización de una celda de combustible de membrana polimérica. Fuente: [9]

La polarización es causada por factores químicos y físicos asociados con varios elementos de la celda de combustible. Estos factores limitan los procesos de reacción cuando circula corriente. Existen tres regiones básicas que afectan a la polarización general:

1. **Polarización por activación:** Esta es la región inicial de la curva donde el voltaje de la celda aumenta rápidamente a medida que aumenta la densidad de corriente. En esta etapa, la reacción electroquímica en la interfaz electrodo-electrolito necesita superar una barrera energética para comenzar. La velocidad de reacción es función de la temperatura, presión y material de electrodo. A altas temperaturas las velocidades de reacción son rápidas y como consecuencia el valor de la activación por polarización

es pequeño. Cuanto menor sea la polarización de activación, más rápido será el inicio de la reacción y más eficiente será la celda.

2. **Polarización por resistencia:** Llamada también región de pérdida óhmica, en esta región, la curva muestra la relación entre el voltaje y la densidad de corriente. Dado que el electrolito y las conexiones terminales de la celda obedecen la ley de Ohm ($V = I \cdot R$), la caída de tensión para forzar la conducción varía linealmente a lo largo de esta región. Esta polarización es causada por la resistencia eléctrica de los componentes de la celda, como los electrodos y el electrolito. Cuanto menor sea esta resistencia, menor será la caída de voltaje en esta región y mejor será el rendimiento de la celda.
3. **Polarización por concentración:** También llamadas pérdidas por transporte de masa se deben a las limitaciones de suministro de reactivos por la tasa de transferencia de masa y a la evacuación de productos. En esta región, los reactivos se consumen a velocidades mayores de las que se pueden suministrar, mientras que el producto se acumula a una velocidad mayor de la que se puede eliminar. Como consecuencia, se genera un gradiente de concentración, que es el que controla el proceso de transporte de masa. En última instancia, estos efectos inhiben la reacción por completo y la tensión de la celda cae hasta cero.

El objetivo en el diseño y operación de celdas de combustible es minimizar estas tres formas de polarización para maximizar la eficiencia y la potencia de la celda. Entender las curvas de polarización es crucial para optimizar las condiciones de funcionamiento de las celdas de combustible y para seleccionar adecuadamente los materiales de los electrodos, electrolitos y catalizadores para mejorar su rendimiento. [38]

Es importante destacar que las características exactas de las curvas de polarización pueden variar según el tipo de celda de combustible, como las celdas de combustible de hidrógeno, metanol o óxido sólido, así como también dependen de factores como la temperatura, la presión y la composición de los materiales utilizados. En la figura 31 se muestra cómo es la variación de las curvas polarización según el tipo de celda.

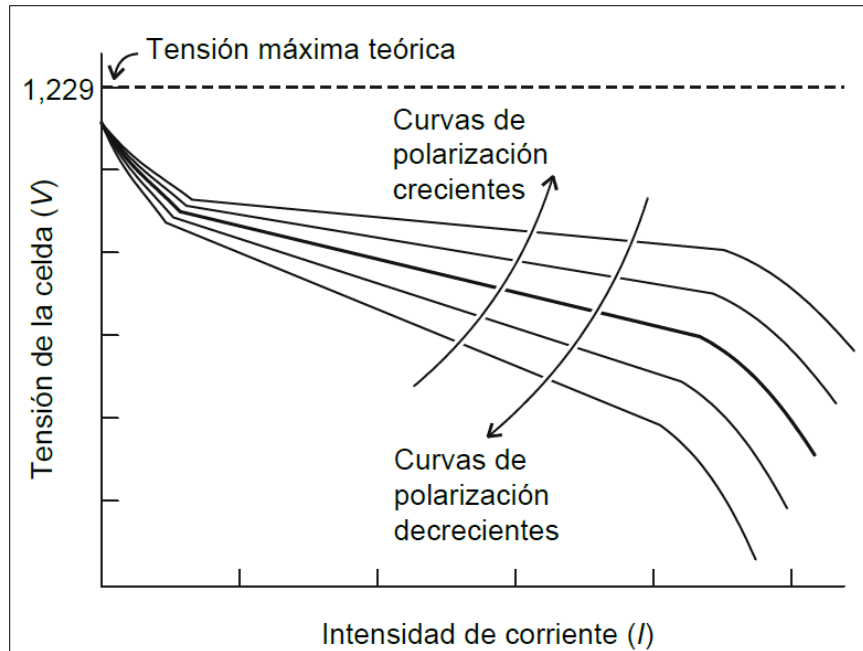


Figura 31 Variaciones en las curvas de polarización de una celda de combustible. Fuente: [9]

Las curvas de polarización de las pilas de combustible normalmente aumentan al aumentar la presión de funcionamiento. En cambio, las curvas disminuyen al disminuir la presión de funcionamiento. Esto se debe a que la velocidad de la reacción química es proporcional a las presiones parciales del hidrógeno y el oxígeno. Cada gas dentro de una mezcla de gases aporta una presión parcial, cuya suma constituye la presión total. Por lo tanto, el efecto del aumento de presión es más notorio cuando se usa un oxidante diluido (como el aire) o un combustible diluido (como el reformado). Presiones más altas ayudan a forzar el contacto del hidrógeno y el oxígeno con el electrolito. Esta sensibilidad a la presión es mayor a altas intensidades de corriente. No obstante, aunque un aumento de presión promueve la reacción electroquímica, introduce otros problemas, ya que los componentes de las pilas de combustible funcionan bajo esfuerzos mecánicos adicionales, que dan lugar a aumentos de tamaño y coste.

Las curvas de polarización de una pila de combustible aumentan al aumentar la temperatura de funcionamiento. Por el contrario, disminuyen al disminuir la temperatura de funcionamiento. Esto se debe a que temperaturas más altas mejoran la transferencia de masa

dentro de las celdas de combustible y originan una disminución neta de la resistencia de la celda (a medida que aumenta la temperatura, la conducción electrónica en los metales disminuye, pero la conducción iónica en el electrolito aumenta). Juntos, estos efectos mejoran la velocidad de reacción.

Para elegir correctamente una celda de combustible, es necesario considerar varios factores y analizar las curvas de polarización como parte de ese proceso de selección y diseño. Estos son algunos puntos importantes para tener en cuenta al utilizar las curvas de polarización para elegir correctamente una celda de combustible:

- **Eficiencia y rendimiento:** Las curvas de polarización proporcionan información sobre cómo varía la eficiencia y el rendimiento de una celda de combustible a diferentes densidades de corriente. Al examinar estas curvas, se puede determinar el punto de operación óptimo para obtener la máxima eficiencia y potencia de la celda.
- **Materiales y componentes:** Las características de las curvas de polarización están relacionadas con los materiales utilizados en los electrodos, electrolitos y catalizadores de la celda de combustible. Al comparar curvas de diferentes celdas, es posible evaluar cómo los materiales influyen en la polarización y en qué medida pueden afectar el rendimiento general de la celda.
- **Tolerancia a variables de operación:** Las curvas de polarización pueden mostrar cómo una celda de combustible responde a cambios en la temperatura, la presión y la composición de los gases de entrada. Esto es crucial para seleccionar una celda que sea adecuada para las condiciones específicas de operación previstas.
- **Estabilidad y durabilidad:** Al analizar las curvas de polarización, es posible identificar regiones de operación donde la celda de combustible puede ser más susceptible a degradación o pérdida de eficiencia. Esto ayuda a elegir una celda que ofrezca una buena estabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo.
- **Aplicación específica:** Dependiendo de la aplicación deseada (como vehículos eléctricos, sistemas de respaldo de energía, generación estacionaria, etc.), las características ideales de las curvas de polarización pueden variar. Evaluar cómo se ajusta una celda de combustible en relación con los requisitos específicos de la aplicación es fundamental para tomar una decisión informada.

- **Economía y costos:** Las curvas de polarización también pueden ayudar a evaluar la eficiencia en función de la inversión inicial y los costos operativos. Una celda de combustible que ofrezca un rendimiento óptimo con una inversión razonable puede ser una elección más económica a largo plazo.

Las curvas de polarización son herramientas esenciales para evaluar y seleccionar adecuadamente una celda de combustible en función de sus requisitos de aplicación, eficiencia, rendimiento y durabilidad. Estas curvas proporcionan información valiosa para tomar decisiones informadas y optimizar el diseño y la operación de celdas de combustible para diversas aplicaciones.

El número de celdas en una pila de combustible (*stack*) está determinado por la tensión del *stack*. Las pilas con un área activa de hasta 1000 cm² se han desarrollado con resultados aceptables, aunque lo más común es que el área sea de entre 50 y 600 cm². El máximo número de celdas en una pila está limitado por las fuerzas de compresión, la rigidez estructural y la caída de presión a través de colectores largos. Se han desarrollado *stacks* con 200 – 250 celdas de forma eficaz. La figura 32 muestra la variación de potencia de los *stacks* conforme cambia el número de celdas y el área de estas.

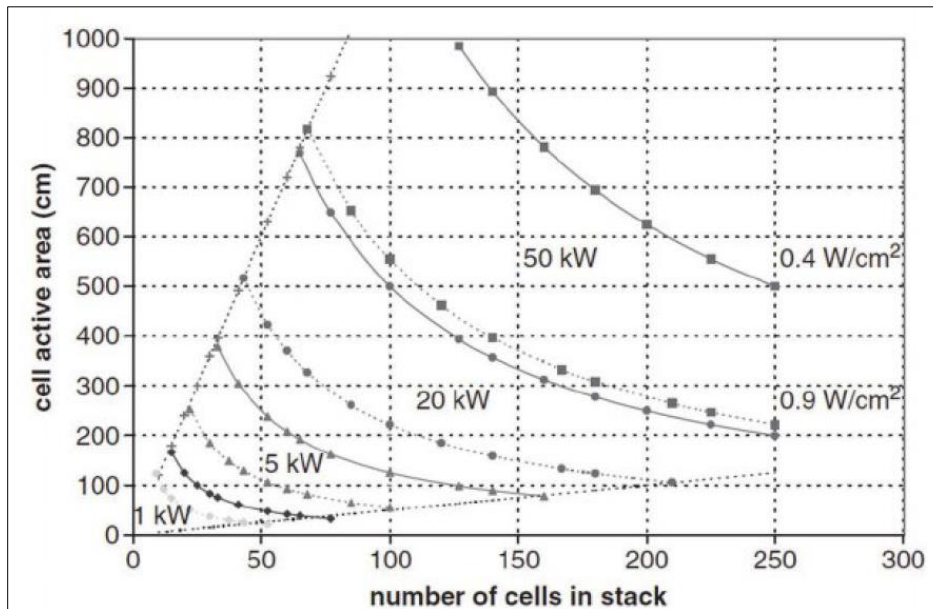


Figura 32 Número de celdas vs área de la celda. Fuente: [41]

Por ejemplo: [43]

Si tenemos una pila tipo PEM de 500 [W], a una tensión de 14.4 [V] y con una tensión de celda de 0.6 [V]. Determinar el número de celdas y la intensidad.

Tenemos que:

Pila PEM 500 [W]

Tensión: 14.4 [V]

Tensión de celda: 0.6 [V]

No. de celdas:

$$Z = \frac{V_{pc}}{V_c} = \frac{14.4 [V]}{0.6 [V]} = 24 \text{ celdas}$$

(15)

Intensidad:

$$I = \frac{P_{pc}}{V_{pc}} = \frac{500 [W]}{14.4 [V]} = 34.7 [A]$$

(16)

En conclusión, para conseguir una pila PEM de 500 W de potencia, con una tensión de 14.4 V, son necesarias 24 celdas.

4.4. Movilidad eléctrica

La industria automotriz está experimentando una revolución en la actualidad con el creciente desarrollo de los autos eléctricos. Estos vehículos impulsados por electricidad se han convertido en una opción cada vez más atractiva para los consumidores, cada vez más conscientes del medio ambiente y preocupados por la sostenibilidad. A medida que la preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes aumentan, los autos eléctricos se presentan como una solución prometedora.

Su impacto ambiental reducido, beneficios económicos y avances tecnológicos están transformando la forma en que entendemos y nos movemos en el mundo de la automoción. Aunque, es una tecnología que se encuentra aún en pleno desarrollo, se están realizando esfuerzos significativos para aumentar la capacidad de las baterías y por tanto la autonomía, algo clave de estos vehículos ya que le permite competir con el vehículo convencional.

Los automóviles eléctricos pueden llegar a utilizar diferentes tecnologías de propulsión que disponen de varios componentes clave que los hacen funcionar de manera eficiente y por lo general se componen básicamente de los siguientes elementos:

- **Motor eléctrico**

Es la principal fuente de energía de un coche eléctrico, convierte la energía eléctrica de la batería en energía mecánica para impulsar las ruedas. Existen diferentes tipos de motores: corriente alterna trifásicos, que pueden ser síncronos o asíncronos, dando cada uno de ellos unas características de funcionamiento diferentes. Los motores eléctricos superan en eficiencia a los motores de combustión interna y, además, no generan emisiones de gases de escape.

- **Transmisión**

Dado que un motor eléctrico es capaz de proporcionar su máximo torque en todo momento, la mayoría de los automóviles eléctricos están diseñados con una sola marcha. Esta característica les permite tener un amplio rango de revoluciones y una gran capacidad para ajustar su velocidad, lo cual elimina la necesidad de cambios de marcha que tradicionalmente ayudan a adaptarse a diferentes velocidades.

- **Baterías**

Es el elemento encargado de almacenar energía mediante procesos electroquímicos para posteriormente alimentar el motor eléctrico y garantizar su correcto funcionamiento. Según la capacidad de almacenamiento, la batería puede tener diferentes tamaños y estar compuesta por materiales específicos que proporcionan características determinantes para cada tipo de vehículo. En los vehículos eléctricos, las baterías de ion-litio son las más utilizadas. Adicional al paquete de baterías, los vehículos eléctricos también cuentan con una batería de 12 V, similar a la que se encuentra en los vehículos de combustión interna. Esta batería suministra electricidad al automóvil antes de que se active la batería principal y proporciona energía a los sistemas auxiliares del vehículo.

- **Inversor conversor de corriente**

Es un dispositivo electrónico que tiene como propósito convertir la corriente continua en corriente alterna, de manera que pueda suministrar la energía almacenada en las

baterías al motor eléctrico. Realiza las conversiones necesarias para ajustar la tensión y la frecuencia de la corriente. Además, otra de sus funciones es recuperar la energía almacenada durante el frenado y devolverla a las baterías.

- **Toma de carga**

Es el componente encargado de recibir energía de la red eléctrica y suministrarla al vehículo de manera apropiada. Su función principal es convertir la corriente alterna en corriente continua para cargar las baterías. Estos cargadores se clasifican según los diferentes modos de recarga que son capaces de admitir, los cuales van desde la carga lenta a la carga rápida.

- **Modulo electrónico ECU**

Es el puesto de mando, donde se regulan la velocidad, el par y la dirección del motor. Controla el flujo de energía entre el paquete de baterías y el motor. Se trata de un convertidor bidireccional: puede enviar energía al motor, pero también extraerla en las fases de desaceleración. [42]

- **Freno regenerativo**

El freno regenerativo es un sistema presente en muchos vehículos eléctricos que permite aprovechar la energía cinética generada durante el proceso de frenado y convertirla en energía eléctrica para recargar las baterías del vehículo. Cuando se aplica el freno, en lugar de utilizar únicamente los frenos mecánicos para reducir la velocidad, el motor eléctrico del vehículo actúa como un generador y convierte la energía cinética en energía eléctrica. Esta energía se almacena en las baterías para su posterior uso, lo que ayuda a aumentar la eficiencia y la autonomía del vehículo eléctrico. El freno regenerativo permite una forma más eficiente de frenado, ya que se recupera parte de la energía que normalmente se disiparía en forma de calor en los frenos mecánicos tradicionales.

Los vehículos eléctricos se dividen en tres categorías principales de tecnologías: eléctricos a batería, híbridos enchufables y celdas de combustible de hidrógeno. En este contexto, centraremos nuestra atención en los vehículos eléctricos con celdas de combustible de hidrógeno. Aunque en todos los casos se emplea un motor eléctrico para propulsar el vehículo

mediante electricidad, es en la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno donde encontramos un enfoque prometedor en el ámbito de la electromovilidad.

4.4.1. BEV (Battery Electric Vehicle)

Son vehículos eléctricos 100%, funcionan exclusivamente con un motor eléctrico, sin necesidad de combustible. Obtienen su energía de baterías recargables al conectarlas a la red eléctrica o aprovechando la energía generada durante la frenada a través del sistema de frenado regenerativo. Este sistema les permite aprovechar la energía cinética del frenado y los hace más eficientes. Además, se caracterizan por su bajo consumo de energía, la ausencia de emisiones contaminantes y la reducida producción de ruido y vibraciones. En comparación con los vehículos de motor de combustión interna, requieren un mantenimiento menor a lo largo de su vida útil.

4.4.2. PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

Los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV), al igual que los HEV, cuentan con dos motores, uno eléctrico y otro de gasolina o diésel, pero se diferencian en el aspecto de las baterías, ya que los PHEV cuentan con un puerto de carga con lo que pueden ser cargadas desde la red eléctrica, además de tener una mayor capacidad. En este tipo de vehículos, el motor eléctrico tiene un mayor tiempo de uso durante la conducción debido a la mayor capacidad de las baterías, esto les permite reducir las emisiones en comparación con los HEV. La autonomía asociada al motor eléctrico sigue siendo una limitación, por lo que la mayor potencia recae en el motor de combustión.

4.4.3. FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

El funcionamiento de estos vehículos es similar al de los eléctricos de autonomía extendida (EREV), pero en lugar de utilizar un motor de combustión interna, se emplea una pila de combustible de hidrógeno y tanques cilíndricos de fibra de carbono de alta presión para almacenar hidrógeno.

Estos vehículos se caracterizan por utilizar hidrógeno como combustible. El proceso de generación de energía eléctrica ocurre mediante una conversión electroquímica en la que el hidrógeno almacenado en los tanques se combina con oxígeno dentro de la pila de combustible, produciendo energía eléctrica y agua. La energía eléctrica generada se almacena en las baterías, que alimentan al motor del vehículo, mientras que el vapor y el nitrógeno sobrantes se liberan, lo que resulta en emisiones nulas de CO₂.

La principal ventaja de estos vehículos es que tienen un peso total menor que los vehículos eléctricos de batería (BEV), ya que reducen el peso de las baterías, aunque requieren más espacio para almacenar el combustible. En la actualidad, diversos fabricantes de vehículos están desarrollando modelos basados en esta tecnología. Hyundai, Toyota y Honda son ejemplos destacados en el segmento de vehículos utilitarios, mientras que en el ámbito de vehículos pesados se utiliza esta tecnología para aumentar la autonomía o satisfacer demandas energéticas más exigentes.

4.4.4. PFCEV (Plug-in Fuel Cell Electric Vehicle)

El vehículo de pila de combustible enchufable es el automóvil más avanzado tecnológicamente, similar a un híbrido enchufable (PHEV) pero en lugar de un motor de combustión interna, utiliza una celda de combustible como generador de energía adicional. Estos vehículos tienen como objetivo solucionar los problemas de autonomía que presentan otros modelos discutidos previamente.

Los PFCEV cuentan con una batería de tamaño moderado que proporciona autonomía totalmente eléctrica y se recarga mediante un puerto conectado a la red eléctrica. Además, poseen un tanque de hidrógeno y una pequeña celda de combustible que actúan como extensores de rango de autonomía. La figura 33 muestra un esquema simplificado del tren motriz de un PFCEV. [32]

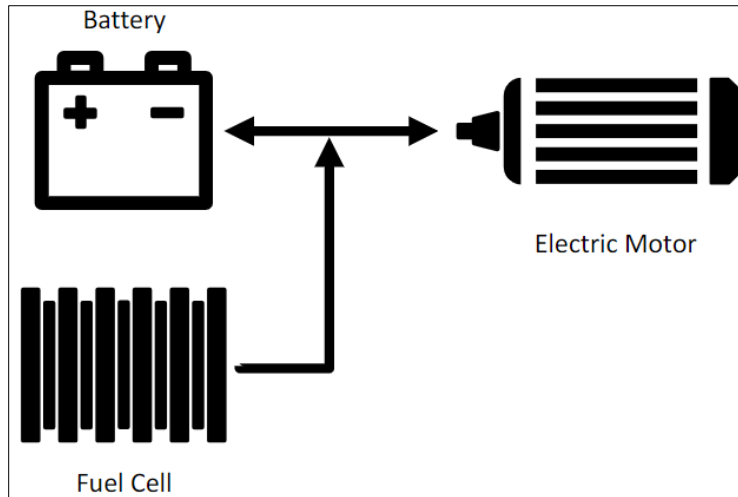


Figura 33 Tren motriz simplificado de un PFCEV. Fuente: [32]

Los PFCEV son una opción muy atractiva como vehículo para la mayoría de los automovilistas en la era de los vehículos eléctricos. Aunque tanto los FCEV como los PFCEV son teóricamente prometedores para el futuro, en la práctica se enfrentan a una serie de desafíos. El principal obstáculo de estos vehículos es la falta de infraestructura para el suministro de hidrógeno como combustible. Mientras que los usuarios de vehículos convencionales pueden repostar fácilmente gasolina o diésel en numerosas estaciones de servicio, el proceso de repostaje de hidrógeno en estos vehículos no resulta tan conveniente.

Encontrar estaciones de reabastecimiento de hidrógeno es una tarea difícil en la mayoría de las ciudades del mundo, a excepción de lugares líderes en esta iniciativa, como Japón, donde ciudades como Tokio y Yokohama han implementado una red de estaciones de hidrógeno en constante expansión. Asimismo, en Estados Unidos, urbes como California, Texas y Nueva York se han destacado por sus esfuerzos en la implementación de esta infraestructura avanzada. En Europa, donde se presenta el mayor número de estaciones de servicio, naciones como Alemania han estado a la vanguardia de la adopción de tecnologías de hidrógeno, con ciudades como Berlín, Hamburgo y Múnich que han establecido una red de estaciones de reabastecimiento para vehículos de celdas de combustible. Además, en Corea del Sur, ciudades como Seúl y Busan también han invertido en la infraestructura necesaria para apoyar la movilidad basada en hidrógeno. Estos lugares han demostrado un compromiso

sólido para fomentar la adopción de vehículos de hidrógeno al establecer una red confiable de estaciones de reabastecimiento, lo que contribuye a impulsar la aceptación y el crecimiento de esta tecnología prometedora. [20]

No obstante, la expansión de esta red de estaciones presenta un gran desafío. La construcción de cada estación de hidrógeno conlleva un costo aproximado de un millón de dólares, lo que genera un dilema financiero y estratégico. Por una parte, la falta de estaciones de hidrógeno limita el alcance y la viabilidad de los vehículos de celdas de combustible, ya que su utilidad está directamente vinculada a la disponibilidad de puntos de reabastecimiento. En cambio, justificar la inversión en la construcción de más estaciones de hidrógeno se vuelve complicado debido a la falta de una flota suficientemente grande de vehículos que las utilicen.

Este ciclo de dependencia mutua entre la infraestructura de reabastecimiento y la adopción de vehículos de hidrógeno crea un desafío para la industria. Se requiere una estrategia integral que incluya incentivos para la adquisición de vehículos de celdas de combustible, así como inversiones estratégicas en la expansión de la red de estaciones de hidrógeno. A pesar de los obstáculos actuales, se vislumbra un futuro en el que la inversión en esta infraestructura, junto con avances tecnológicos continuos, podría facilitar el camino para una adopción más generalizada y sostenible de los vehículos de hidrógeno.

4.5. Vehículos de celda de combustible en el mercado.

A diferencia de los vehículos con motor de combustión de hidrógeno, en la actualidad, encontramos varios modelos de vehículos que hacen uso de celdas de combustible como fuente de energía, aunque su disponibilidad se limita a ciertos mercados internacionales. Esta limitación se debe principalmente a la escasez de infraestructura de estaciones de servicio de hidrógeno. Estos vehículos se conocen como vehículos de hidrógeno o vehículos de pila de combustible. Algunos ejemplos de vehículos en la actualidad con celdas de combustible son:

- **Toyota Mirai 2da generación:** El Toyota Mirai (figura 34) es un sedán de pila de combustible de hidrógeno que se comercializa en varios países. Ofrece una conducción

silenciosa y cero emisiones, con una autonomía que ronda los 650 km aproximadamente gracias a un tercer depósito en comparación a la primera generación, en cuanto al motor también hay un incremento en la potencia dando como resultado 180 HP en esta nueva generación. El tiempo de repostaje es de unos 5 minutos.



Figura 34 Toyota Mirai de segunda generación. Fuente: [44]

- **Hyundai NEXO:** El Hyundai NEXO, mostrado en la figura 35 es otro vehículo de pila de combustible de hidrógeno que se destaca por su diseño moderno y características de seguridad avanzadas. Ofrece una autonomía de aproximadamente 666 km con un reabastecimiento de tan solo 5 minutos. Además, el aire se filtra y purifica mientras conduces, reduciendo la contaminación producida por partículas, al mismo tiempo que con el aire purificado la pila de combustible funcione correctamente.



Figura 35 Hyundai NEXO. Fuente: [45]

- **Honda Clarity Fuel Cell:** El Honda Clarity Fuel Cell (figura 36) es un sedán de pila de combustible que ha estado disponible desde hace algunos años en mercados selectos. Ofrece un diseño espacioso y un rendimiento eficiente en términos de consumo de hidrógeno, actualmente está trabajando con la empresa General Motors (GM) desarrollando un nuevo sistema de pila de combustible.



Figura 36 Honda Clarity Fuel Cell. Fuente: [46]

- **Mercedes-Benz GLC F-CELL:** Este vehículo (figura 37) es un SUV híbrido de celdas de combustible de hidrógeno y baterías eléctricas. Combina la tecnología de la celda de combustible con una batería recargable, por lo que se le consideraba un vehículo eléctrico de celda de combustible enchufable (PFCEV). Este modelo cuenta con dos tanques de hidrógeno con 4.4 kg de capacidad a 700 bares de presión y una pila de combustible bajo el capó. Además, el vehículo equipa una batería de iones de litio que puede recargarse enchufando el coche a la red eléctrica. El coche puede alimentarse indistintamente de la batería o del hidrógeno, o bien funcionar en modo híbrido combinando automáticamente ambas opciones. En suma, la autonomía con hidrógeno alcanzaba los 478 kilómetros y la batería proporcionaba 51 km adicionales, ambas cifras daban una autonomía de 529 km. El propulsor es un motor eléctrico con 215 HP de potencia y 365 Nm de par, y podía alcanzar una velocidad máxima de 160 km/h (limitada electrónicamente). [47]



Figura 37 Mercedes-Benz GLC Fuel Cell. Fuente: [47]

- Nikola Tre:** El Nikola Tre como se muestra en la figura 38, es un camión de carga eléctrico con tecnología de pila de combustible de hidrógeno que representa un avance significativo en la movilidad sostenible para el transporte de mercancías. Con una autonomía de 805 kilómetros, se posiciona como líder en su categoría. El tiempo de repostaje del Nikola Tre tan solo requiere de 20 minutos para cargar completamente, esto significa menos tiempo de inactividad para los conductores y una mayor eficiencia en las operaciones de transporte. Bosch está a cargo de los módulos de energía de pila de combustible de estos vehículos, garantizando la calidad y confiabilidad de la tecnología que impulsa al Nikola Tre. En cuanto a su desempeño, este camión eléctrico cuenta con una potencia de 536 HP, lo que asegura la capacidad de enfrentar las demandas del transporte de carga con facilidad.

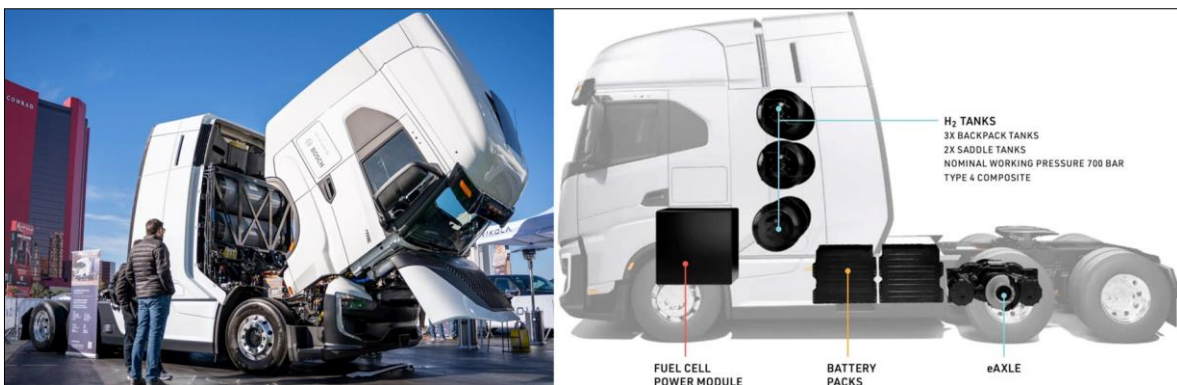


Figura 38 Nikola Tre Fuel Cell. Fuente: [51]

Estos vehículos de celda de combustible están diseñados para proporcionar una movilidad más limpia y sostenible, al eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, la disponibilidad de estos vehículos aún está limitada debido a desafíos relacionados con la infraestructura de hidrógeno y los costos de producción. A medida que la tecnología avanza y se amplía la red de estaciones de hidrógeno, es probable que veamos un aumento en la adopción de vehículos con celdas de combustible en el futuro.

5. Conclusiones

Las propiedades del hidrógeno hacen que sea un combustible con gran factibilidad para ser usado en diversas aplicaciones energéticas y medioambientales. Su alta densidad energética, la capacidad de ser producido por distintos métodos y sobre todo a partir de fuentes renovables, y su emisión de residuos mínimos lo convierten en una opción atractiva para impulsar la movilidad sostenible, y reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la industria automotriz.

A pesar de las ventajas del hidrógeno como combustible, su implementación enfrenta desafíos, principalmente relacionados con su producción. Actualmente, algunos métodos de producción de hidrógeno utilizan fuentes de energía no renovables, lo que podría contrarrestar sus beneficios en términos de emisiones contaminantes. Para que el hidrógeno sea una fuente de energía verdaderamente limpia, es esencial que su producción se base en energías renovables. De lo contrario, aunque los vehículos de hidrógeno emiten solo vapor de agua, estaríamos trasladando el problema de la contaminación en lugar de solucionarlo.

Además, surge otro desafío relacionado con el almacenamiento y transporte del hidrógeno. Debido a sus propiedades, se plantean complicaciones en términos de seguridad durante el transporte y un aumento significativo en los costos asociados a los vehículos. Para abordar estos desafíos, es fundamental desarrollar tecnologías de almacenamiento seguras y eficientes, así como infraestructuras adecuadas para el transporte de hidrógeno.

Un desafío crucial en la adopción de vehículos de hidrógeno es la falta de infraestructura, un problema que afecta a la expansión comercial de esta tecnología. Actualmente existen muy pocas estaciones de hidrógeno, pues países como Alemania, España, Francia, China y Japón lideran en el número de estaciones de hidrógeno, lo que dificulta su difusión rápida en el mercado. La adaptación para la distribución masiva de hidrógeno requeriría costos significativos que aún no se han abordado. Esta limitación plantea un obstáculo importante para la adopción generalizada de vehículos propulsados por hidrógeno en el corto plazo.

Los vehículos eléctricos de celda de combustible llevan una gran ventaja en comparación con los vehículos de combustión interna a base de hidrógeno debido a su mayor eficiencia energética y su impacto ambiental reducido. Mientras que los vehículos de combustión interna a base de hidrógeno enfrentan desafíos relacionados con la eficiencia y la emisión de contaminantes, los vehículos eléctricos de celda de combustible utilizan la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno para generar electricidad de manera limpia y eficiente. Además, los vehículos de celda de combustible ofrecen tiempos de recarga más rápidos y una mayor autonomía en comparación con sus contrapartes de hidrógeno, lo que los convierte en una opción más viable y sostenible para la movilidad del futuro.

En cuanto al avance de la implementación de estos nuevos tipos de vehículos, en la actualidad, hay una amplia gama de modelos de vehículos eléctricos de celda de combustible disponibles en el mercado, mientras que los vehículos de combustión interna que utilizan hidrógeno están todavía en una etapa de pruebas y experimentación. Se espera que estos últimos solo estarán disponibles en un mercado limitado y se verán principalmente en competencias de fabricantes como las 24 horas de Fuji en Japón.

Esta investigación se creó para respaldar el diseño y la ejecución de futuros proyectos experimentales relacionados con el uso del hidrógeno en vehículos. México posee la infraestructura adecuada para incorporar proyectos de investigación de vanguardia en su panorama científico. Esto inicia el camino para anticipar un futuro en el que la dependencia de los combustibles fósiles se reduzca de manera significativa, marcando un paso crucial hacia la sostenibilidad y la innovación en la movilidad.

6. Referencias

- [1] González, I. (2022). *Airlander 10, el dirigible con capacidad para 100 pasajeros que unirá ciudades españolas en 2026*. El español. Recuperado el 8 de agosto de 2023, de: https://www.elespanol.com/omicron/tecnologia/20220616/airlander-dirigible-capacidad-pasajeros-unira-ciudades-espanolas/680432171_0.html
- [2] Verne, J. (1874). *La Isla Misteriosa*.
- [3] Centro Nacional de Hidrogeno. (2021). *El Hidrógeno*. CNH2. Recuperado el 4 de mayo de 2023, de: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [4] Sørensen, B. & Spazzafumo, G. (2018). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. (3ra ed.). Elsevier.
- [5] The Engineering ToolBox (2018). *Hydrogen - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure*. Recuperado el 30 de junio de 2023, de: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-H2-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2044.html
- [6] (S/f). Gstatic.com. *Electrolysis of Water*. Recuperado el 31 de julio de 2023, de https://t2.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcQ1ZEbbuV2T9orQbGHua76ZKPsDI-i3q59j7fIDb1ghBetVUKWBbEm1-D_Mqm-xeUTb
- [7] Laidler, K. (1990). *Historia de la Electrolisis*. SITESA. Recuperado el 14 de marzo de 2023, de: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/download/66993/58888>
- [8] Departamento de Energía (DOE), EUA (2021). *The Influence of Fuel Cell, Hydrogen Production, and Hydrogen Storage Patents Funded by the U.s. department of Energy's Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office and Other DOE offices*. Energy.gov. Recuperado el 31 de julio de 2023, de <https://www.energy.gov/eere/analysis/influence-fuel-cell-hydrogen-production-and-hydrogen-storage-patents-funded-us>
- [9] Aguado, R. et. Al. (2021). *Hidrógeno y su Almacenamiento: El Futuro de la Energía Eléctrica*. Universidad de Coruña. Recuperado el 23 de marzo de 2023, de: <https://www.udc.gal/publicacions>
- [10] Torre, F. (2022). *Ciclos Termoquímicos de División del Agua: Una Tecnología Prometedora Para Convertir la Luz Solar y el Calor Residual en Hidrógeno Verde*. CICenergiGUNE. Recuperado el 22 de marzo de 2023, de: <https://cicenergigune.com/es/blog/twsc-ciclos-termoquimicos-division-agua-convertir-luz-solar-y-calor-residual-hidrogeno-verde>
- [11] Linares, J. I. & Moratilla, B. Y. (2007). *El Hidrógeno y la Energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- [12] (S/f). Elordenmundial.com. Recuperado el 9 de agosto de 2023, de <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>

- [13] Santiago, O. (2017). *Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques. Apilados*. Recuperado el 3 de abril de 2023, de: <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- [14] PROMAX. (2015). *Microesferas de vidrio*. PROMAXInd.com. Recuperado el 28 de marzo de 2023, de: <https://www.promaxind.com/es/productos/microesferas-de-vidrio/>
- [15] Focus Technology Co, (2023). *Soldado aislamiento termo Dewar tanques criogénicos*. Made-in-china.com. Recuperado el 31 de julio de 2023, de https://es.made-in-china.com/co_msgascylinder/product_Thermos-Welded-Insulated-Cryogenic-Dewar-Tanks_ysushggurg.html
- [16] (S/f). *Helium tube trailers*. Linde. Recuperado el 2 de agosto de 2023, de <https://www.lindedirect.com/gas-supply-modes/helium-tube-trailers>
- [17] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2020). *Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable*. (MITERD). Recuperado el 27 de julio de 2023, de: https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf
- [18] Fábrega, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado el 14 de junio de 2023, de: <http://hdl.handle.net/2099.1/6533>
- [19] M., S. (2021). *Así es la primera «hidrogenera» inaugurada en España*. ABC.es. Recuperado el 29 de julio de 2023, de: https://www.abc.es/motor/economia/abci-primer-hidrogenera-inaugurada-espana-202101290118_noticia.html
- [20] H2-stations. (2020). *H2stations.org*. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de: <https://www.h2stations.org/>
- [21] (S/f). *Historia de los coches de hidrógeno*. Blue Motion. Edu.tr. Recuperado el 20 de julio de 2023, de: <https://web.itu.edu.tr/celikmuhamm/bil103/company/webpage.html>
- [22] Hydro, K. (2012). *1860-Hippomobile*. Flickr. Recuperado el 2 de agosto de 2023, de: <https://www.flickr.com/photos/hydroencarsnow/8136690996>
- [23] Blancafort, R. (2021). *El día que Jack Nicholson “inventó” el motor de hidrógeno*. La Vanguardia. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de: <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20210522/7471319/coche-motor-hidrogeno-jack-nicholson.html>
- [24] Sirvent, G. (2023). *BMW fabricó en 2006 un motor bivalente que carburaba con gasolina e hidrógeno*. Top Gear España. Recuperado el 2 de agosto de 2023, de: <https://www.topgear.es/noticias/garaje/bmw-fabrico-2006-motor-bivalente-carburaba-gasolina-hidrogeno-1272760>

- [25] Fernández, E. (2010). *Libro de Excel para el cálculo térmico de los motores de combustión interna*. [Trabajo de diploma, Facultad de ingeniería, Universidad de Holguín]. Recuperado el 20 de junio de 2023, de: <https://repositorio.uho.edu.cu/xmlui/bitstream/handle/uho/556/Trabajo%20de%20Diploma%20Eduardo%20Fernández%20Aguiar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [26] Escalante, M. (2008). *Estudio de Factibilidad Técnica de las Adaptaciones en Motores de Combustión Interna Para Utilizar Mezclas Gas-Hidrógeno*. [Tesis de Maestría, Centro de Investigación ene Energía, UNAM]. Recuperado el 2 de marzo de 2023, de: <http://132.248.9.195/ptd2008/noviembre/0636605/Index.html>
- [27] Anónimo. (2011). *Mantenimiento motor diésel*. Slideshare.net. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de: https://es.slideshare.net/Luis_Reveco/mantenimiento-motor-diesel
- [28] Mecánica y electrónica, D. (s/f). *Evolución de la inyección*. Centro-zaragoza.com. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R57_A7.pdf
- [29] Chavarría, L. (2013). *Inyección electrónica*. Slideshare.net. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de <https://es.slideshare.net/nandolf/inyecin>
- [30] Marcas, M. P. (2022). *Motor de combustión de hidrógeno: sostenibilidad y deportividad al mismo tiempo*. Motorpasion.com; Motorpasion. Recuperado el 21 de agosto de 2023, de: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/motor-combustion-hidrogeno-sostenibilidad-deportividad-al-tiempo>
- [31] de la Torre, A. (2022). *El hidrógeno quiere mantener vivos los motores de combustión. Y lo tiene todo en contra, incluido el propio hidrógeno*. Xataka.com; Xataka Movilidad. Recuperado el 21 de agosto de 2023, de: <https://www.xataka.com/movilidad/hidrogeno-quiere-mantener-vivos-motores-combustion-tiene-todo-incluido-propio-hidrogeno>
- [32] Lane, B. (2017). *Plug-in fuel cell electric vehicles: A vehicle and infrastructure analysis and comparison with alternative vehicle types*. Universidad de California, Irvine. Recuperado el 15 de marzo de 2023, de: <https://escholarship.org/uc/item/57h0j2sv>
- [33] Asensio, P. (2007). *Hidrógeno y Pila de Combustible*. Energías Renovables. Recuperado el 20 de abril de 2023, de: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/08/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-hidrogeno-y-pila-de-combustible-fenercom.pdf>
- [34] Junyent, E. (2011). *Hidrógeno. Estudio de sus Propiedades y Diseño de una Planta de Licuado*. Facultad de Náutica de Barcelona. Recuperado el 12 de junio de 2023, de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%C3%B3geno%20PFC.pdf>
- [35] Panayiotou, G., Kalogirou, S., & Tassou, S. (2010). *PEM fuel cells for energy production in solar hydrogen systems*. Recent Patents on Mechanical Engineering. Vol. 3.

- [36] Suárez, K. (2019). *Un Poco de Todo Sobre el Hidrógeno*. Ciencia. Recuperado el 10 de abril de 2023, de: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/Hidrogeno.pdf
- [37] Asociación Española de Pilas de Combustible. (2023). *APPICE*. Recuperado el 6 de junio de 2023, de: <https://appice.es/>
- [38] Arribas, E. et al. (2006). *Pilas de Combustible*. Real Sociedad Española de Química. Recuperado el 25 de mayo de 2023, de: www.rseq.org
- [39] Fernández, M. (2009). *Celdas de Combustible*. [Tesis de Grado, Universidad de los Andes]. Recuperado el 14 de junio de 2023, de: <http://bdigital2.ula.ve/bdigital/>
- [40] Liviano, S. (2012). *Pilas de Combustible, Electricidad Para el Futuro Inmediato*. Técnica Industrial. Recuperado el 23 de febrero de 2023, de: <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/85/950/a950.pdf>
- [41] Vílchez, R. (2009). *El Hidrógeno*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado el 17 de mayo de 2023, de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7538/Anexo+I+-+El+hidrogeno.pdf?sequence=2>
- [42] Díez, P. (2019). *Principios Básicos del Vehículo Eléctrico*. [Tesis de Grado, Universidad de Valladolid]. Recuperado el 12 de julio de 2023, de: <https://core.ac.uk/download/pdf/222807924.pdf>
- [43] ASEPA. *Curso de especialización 'El hidrógeno en automoción'*. Madrid, España.
- [44] TOYOTA Global. (2021, marzo 29). *TOYOTA MIRAI | 2nd Generation Toyota Fuel Cell System / Toyota* [video]. YouTube. Recuperado el 23 de agosto de 2023, de: <https://youtu.be/-tmuiHm5sbc>
- [45] Arboleda, J. (2023). *Curso Hyundai FCEV*. Madrid, España.
- [46] García, G. (2021). *Un NO (y un SÍ) al hidrógeno: Honda deja de fabricar el Clarity Fuel Cell*. Híbridos y Eléctricos. Recuperado el 23 de agosto de 2023, de: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/hidrogeno-honda-deja-fabricar-clarity-fuell-cell_46336_102.html
- [47] Gutiérrez, D. (2020). *Mercedes abandona el proyecto del GLC F-Cell de hidrógeno, un SUV tan complejo como interesante*. Híbridos y Eléctricos. Recuperado el 23 de agosto de 2023, de: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/mercedes-cesa-produccion-glc-fcell-hidrogeno_34665_102.html
- [48] González, A. (2021). *Iveco y Nikola están listas para empezar la producción del camión eléctrico Nikola Tre*. Híbridos y Eléctricos. Recuperado el 23 de agosto de 2023, de: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/camion-electrico-nikola-tre-listo-inicio-produccion_49219_102.html

- [49] (S/f). *Ciclo Otto*. Autocasion.com. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de: <https://www.autocasion.com/diccionario/ciclo-otto>
- [50] (S/f). *El almacenamiento de hidrógeno: las pilas de combustible*. Climantica.org. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de <http://unidades.climantica.org/es/unidades/02/uso-actual-da-enerxia/alternativa-do-hidroxeno/3>
- [51] Ross, S. (2024). *Nikola TRE FCEV: Leading the charge in hydrogen-powered trucking*. Paisley Autocare. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de: <https://paisleyautocare.co.uk/blogs/news/nikola-tre-fcev-leading-the-charge-in-hydrogen-powered-trucking>

7. Bibliografía

- Anónimo. (2018). *Geoffrey Ballard el “Héroe del Planeta” que inventó el primer autobús cero emisiones*. El blog de Sectorbus. Recuperado el 20 de julio de 2023, de: <https://sectorbus.com/blog/movilidad-sostenible/primer-autobus-cero-emisiones/>
- Anónimo. *Plataforma de Electromovilidad*. Recuperado el 21 de julio de 2023, de: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias>
- Barrientos, P. (2019). *¿Quién fue Harry Karl Ihrig?* Parabrisas. Recuperado el 26 de julio de 2023, de: <https://parabrisas.perfil.com/noticias/hombres-de-auto/hombres-de-auto-quien-era-harry-karl-ihrig.phtml>
- Cruz, O. & Jiménez, D. (2010). *Efecto de los Tratamientos Térmicos en la Circona Utilizada Como Electrolito en las Pilas de Combustible de Óxido Sólido*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado el 22 de junio de 2023, de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10499/Mem%c3%b2ria.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Espinoza, A. & Rojas, V. H. (2013). *Sistema Híbrido de Hidrógeno Para Motores de Combustión Interna a Partir de Una Celda Electrolítica*. [Tesis de Grado, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM]. Recuperado el 15 de marzo de 2023, de: <http://132.248.9.195/ptd2013/noviembre/0706167/Index.html>
- Ford Motor Company. (2023). Recuperado el 5 de julio de 2023, de: <https://www.ford.es/hibridos-electricos/hibrido-ligero#>
- Gallego, J. S. (s/f). *Vehículo Eléctrico: Presente y Futuro*. Universidad europea.com. Recuperado el 15 de julio de 2023, de: https://universidadeuropea.com/resources/media/documents/21_STEAM_COCHE_ELECTRICO_RZ.pdf

- INEEL México. (2017). *Vehículo Eléctrico con celdas de combustible a hidrógeno*. [Video]. YouTube. Recuperado el 25 de mayo de 2023, de: <https://youtu.be/LueKseWXEvM>
- Lineo, F. (2004). *Celdas de Combustible*. Universidad de Chile. Recuperado el 25 de mayo de 2023, de: <https://docplayer.es/9171346-Celdas-de-combustible.html>
- López, J. (s/f). *El hidrógeno y el transporte sostenible*. Aec.es. Recuperado el 20 de junio de 2023, de: https://www.aec.es/c/document_library/get_file?p_1_id=51544&folderId=101635&name=D_LFE-5433.pdf
- Motorpasion. (2022). *La curiosa historia del hidrógeno como combustible en automoción: un relato que se empezó a escribir en... ¡1806!* Motorpasion.com. Recuperado el 30 de junio de 2023, de: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/curiosa-historia-hidrogeno-como-combustible-automocion-relato-que-se-empezo-a-escribir-1806>
- OMPI. (2009). *Tecnologías ecológicas: Automóviles eléctricos y pilas de hidrógeno*. Wipo.int. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de https://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2009/02/article_0009.html
- Pastor, L. (2018). *Tipos de Vehículo Eléctrico*. Compartiendo Conocimiento. Recuperado el 29 de junio de 2023, de: <https://luispastor.es/compartiendo/VE/pdf/Clasificacion.pdf>
- Ramos, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna*. Facultad de Náutica, Barcelona. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/41801881.pdf>
- Rodrigo, J. (2009). *Motores Hidrógeno: Tipos y características*. Centro-zaragoza.com. No. 42. Recuperado el 15 de julio de 2023, de http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R42_A6.pdf
- Rozo, S. M. & Tibaquirá, J. E. (2007). *Celdas de Combustible Tipo Membrana de Intercambio Protónico*. Scientia et Technica. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Recuperado el 15 de junio de 2023, de: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84903747.pdf>
- Sánchez, J. (2022). *Vehículo Eléctrico: Presente y Futuro*. UEM STEAM Essentials. Recuperado el 28 de junio de 2023, de: https://universidadeuropea.com/resources/media/documents/21_STEAM_COCHE_ELECTRICO_RZ.pdf
- Toyota.es. (2023). *Componentes de un coche 10% eléctrico*. Toyota. Recuperado el 29 de junio de 2023, de: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-de-un-coche-electrico-toyota>
- Valdés, T. (2015). *Hidrógeno y Transporte*. Ciencia y Presencia. Recuperado el 9 de junio de 2023, de: <https://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/03/hidrogeno-y-transporte.html>