

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN MODO DUAL GASOLINA - HIDRÓGENO

Cesar Castaño Soto

Johny Alberto Arbeláez Londoño

Ingeniería Electromecánica

Carlos Alberto Acevedo Álvarez, Ph.D

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

28 de julio de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

RESUMEN

Con este proyecto de grado, se logra evaluar de manera experimental las implicaciones de operar con el hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna de un Renault 6 en modo dual, para dar a conocer las modificaciones, los montajes y las nuevas tecnologías que existen para abastecer un motor en modo dual, además se logra hacer una evaluación del rendimiento ambiental para hacer un análisis comparativo entre las emisiones dadas por un analizador de gases y las demandadas por la norma ambiental actual. Finalmente en este trabajo se encuentra que las emisiones de CO₂ están 3.85% en base volumétrica más altas que las emisiones restringidas por la ley, debido a la antigüedad y a la falta de sistemas de captación del carro; mientras que las emisiones de CO están 0.56% más bajas comparadas con la norma.

Palabras clave: Hidrógeno como combustible, celdas de hidrógeno, pilas de combustible, conservación ambiental, combustibles fósiles.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a Dios por permitirnos trabajar, estudiar y luchar por nuestros sueños. A nuestro asesor de trabajo de grado, a la universidad y a los profesores que durante nuestra carrera nos ayudaron en todo momento.

Un agradecimiento a mi hijo Emmanuel Arbeláez Arévalo por ser el motivo de mi lucha constante y por el amor que me entrega.

Johny

Por mi parte quiero agradecer a mis padres, por la vida y por el esfuerzo y el ánimo que me ofrecieron siempre.

Cesar

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

ACRÓNIMOS

AFC: Alkaline Fuel Cells

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell

GNV: Gas Natural Vehicular

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell

PEM: Proton Exchange Membrane, o Polymer Electrolyte Membrane

RES: Energías Renovables Libres de Emisiones

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	9
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Hidrógeno y celdas combustibles.....	12
2.1.1 Algo de historia	12
2.1.2 Obtención del hidrógeno	14
2.1.3 La pila de combustible.....	15
2.1.3.1 Eficiencia de la pila de combustible	19
2.1.3.2 Composición.....	19
2.1.4 Aplicaciones.....	20
2.1.4.1 Electrónica de potencia.....	21
2.1.4.2 Aplicaciones en transporte.....	21
2.1.4.3 Otras aplicaciones	22
2.1.5 Almacenamiento del hidrógeno.....	23
2.1.6 Consideraciones	24
2.2 Comparación del hidrógeno con otros combustibles	25
2.3 Hidrógeno vs otro combustible.....	26
2.4 Sistemas de almacenamiento del combustible.....	27
2.5 Impacto ambiental	28
2.6 Combustión del Hidrógeno en motores de combustión interna	30
2.6.1 Modificaciones a un motor para usar combustible	31
2.7 Partes del motor de hidrógeno	32
2.8 Proyectos actuales de motores de combustión interna operando con hidrógeno.	34
2.8.1 Mercedes F125.....	34
2.8.2 Hidrógeno como combustible para transbordadores y aviones.....	35
2.9 Proyecciones del uso de combustible en el Valle de Aburrá	36
3. METODOLOGÍA.....	37

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1	Evaluar experimentalmente las modificaciones y adaptaciones.....	43
4.2	Evaluar el rendimiento ambiental del motor en modo dual hidrógeno y gasolina	45
4.3	Reducción del consumo específico de combustible con la adición de hidrógeno.....	49
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	52
	REFERENCIAS	53

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema de una pila de combustible.....	16
Ilustración 2. Despiece de una pila de combustible.....	19
Ilustración 3. Diagrama simplificado de un proceso de electrólisis.....	20
Ilustración 4. Diagrama del sistema de almacenamiento de hidrógeno	24
Ilustración 5. Unidades elementales de las redes metal-orgánicas.....	28
Ilustración 6. Esquema básico de los componentes de un vehículo a base de hidrógeno	32
Ilustración 7. Partes de un motor de hidrógeno	33
Ilustración 8. Mercedes F125	35
Ilustración 9. Instalación de la celda de combustible en el chasis del carro.....	38
Ilustración 10. Perforación del filtro de aire para la adición de hidrógeno.	39
Ilustración 11. Recipiente de almacenamiento del agua y del electrolito.....	39
Ilustración 12. Modelo experimental.....	40
Ilustración 13. Instalación del analizador de gases en el mofle del carro.....	41
Ilustración 14. Celda de combustible fijada y funcionando.	43
Ilustración 15. Conexión de la celda a la batería.....	44
Ilustración 16. Pantalla del analizador de gases mostrando las condiciones del análisis.....	45
Ilustración 17. Emisiones de HC	47
Ilustración 18. Emisiones de CO.....	48
Ilustración 19. Emisiones de CO ₂	49
Ilustración 20. Consumo de combustible Vs recorrido sin la adición de hidrógeno.....	50
Ilustración 21. Consumo de combustible Vs recorrido con la adición de hidrógeno.	51

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

Lista de tablas

Tabla 1. Principales tipos de pilas combustibles más usadas.	17
Tabla 2. Propiedades energéticas del hidrógeno comparado con otros combustibles	25
Tabla 3. Características del motor usado.	37
Tabla 4. Diseño experimental para recolección y análisis de datos.....	40
Tabla 5. Normatividad para emisiones contaminantes en vehículos con ciclo Otto	45
Tabla 6. Resultados del analizador de gases.	46

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

1. INTRODUCCIÓN

La evolución del mundo y con ello los adelantos científicos ha traído avances tecnológicos y herramientas para una mejor percepción del mundo y facilidad en la consecución de muchos de los trabajos que a diario realizamos. Por esta razón, el ser humano siempre está en constante relación con la idea de progreso y de hacer más amenas las condiciones de supervivencia de los seres de este planeta. Sin embargo, con el transcurso de la historia y al dejarse al descubierto muchos de los problemas ambientales, a estas ideas de progreso, evolución y adecuación de la vida terrestre, se sumó la idea de una sostenibilidad ambiental, ya que los problemas medioambientales con el transcurso del tiempo se han venido incrementando, de ahí que se note la presencia de ríos sucios, cambios ambientales y detrimento de los suelos.

De manera que a partir de este problema es necesario que se tomen medidas de regulación y medidas de prevención para la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Y esta es una de las razones por las que se están trabajando intensa y arduamente alrededor de tecnologías que puedan suplir la necesidad que acarrea la sostenibilidad ambiental (Ji et al, 2011).

Los motores de combustión interna contribuyen a la contaminación ambiental, ya que pueden emitir gases nocivos para el medio ambiente, pero no es algo intencional, simplemente que con el desarrollo de estos y con el desconocimiento que anteriormente se tenía sobre los problemas ambientales, estos motores lograron un auge sorprendente, que incluso en la actualidad son muy difíciles de dejar a un lado (Ji et al, 2011).

De allí es donde surge el hidrógeno como combustible, de la búsqueda de alternativas eficientes, y cabe destacar que es realmente una gran alternativa debido a sus

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

prestaciones, a sus beneficios, a su cantidad de ventajas y a su alta eficiencia, por esto es llamado el combustible del futuro (Wang et al, 2014), sin embargo, hay inconvenientes actuales para su almacenamiento y los costos iniciales del equipo son muy altos (Liu et al, 2013).

- **Objetivos**

- **Objetivo general**

Desarrollar un modelo experimental de celda de combustible con la capacidad para suplir las necesidades de consumo de un motor de combustión interna de 1300 cc que permita mejorar su eficiencia y al mismo tiempo reducir las emisiones contaminantes.

- **Objetivos específicos**

- Evaluar experimentalmente las modificaciones y adaptaciones para el funcionamiento en modo dual del motor.
 - Evaluar el rendimiento ambiental del motor en modo dual hidrógeno y gasolina.
 - Reducir el consumo de combustible del motor con la adición de hidrógeno a este.

Finalmente, el lector en este trabajo encuentra algo de historia de las celdas de hidrógeno, cómo se obtiene éste y qué función cumple una pila de combustible, para que seguidamente se pueda dar paso a la identificación de la eficiencia de la pila y señalar la composición de ésta. Es importante dar una revisión a las aplicaciones del hidrógeno como combustible, cómo se almacena y dar unas consideraciones generales para entender la comparación con otros tipos de combustible. Finalmente se obtienen resultados y posibles discusiones que apuntan a una comparación del hidrógeno y la utilización como combustible, cómo se almacena, el impacto ambiental, el uso en

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

motores, las tendencias de construcción, lo relevante del mantenimiento y finalmente se concluye con este proyecto apuntando a los resultados y trabajos futuros sobre este tipo de tecnología.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Hidrógeno y celdas combustibles

Es una alternativa en combustibles que debe ser creada a partir de otra fuente de energía, como por ejemplo lo son las fuentes de hidrocarburos de los compuestos fósiles o el agua, debido a que una celda combustible por sí sola no es una fuente de energía, y mucho menos se debe confundir con otras fuentes como lo son las de energías renovables: gas natural, petróleo, entre otras; que representan (según estudios) un aporte mucho menos elevado en cuanto a energía se trata, que queda almacenado en el hidrógeno, ya que como los otros tipos de combustibles, éste puede ser almacenado y transportado. El hidrógeno cumple con las mismas características de los combustibles actuales, pero con la diferencia de que este puede trabajar sin emitir sustancias o gases contaminantes a la atmósfera (Verhelst, 2013).

El hidrógeno es un elemento que cuenta con un gran poder calorífico. Esto porque cada porción de trabajo puede liberar mucha más energía, comparado con otro tipo de combustible utilizado en las mismas porciones, incluso aunque el hidrógeno sea mucho menos denso tanto en estado líquido como en sólido, a comparación de los otros tipos de combustibles que pueden ser mucho más voluminosos y pesados (JI & Wang, 2009).

2.1.1 Algo de historia

Hace alrededor de cien años, cuando iniciaba el siglo XX, en el ambiente occidental había un gran auge del progreso científico y tecnológico; máquinas y mensajes telegráficos sin hilos estaban presentes en esa época, desencadenando un siglo de desarrollo revolucionario en los transportes y las comunicaciones. Otros avances, como lo eran la publicación de Albert Einstein en 1905 sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, adelantaban igualmente el progreso científico (Bixler, 2012). Sin embargo,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

mientras esto ocurría, la mayor parte de las casas seguían consumiendo combustibles y gas del alumbrado en zonas urbanas privilegiadas. El químico británico Joseph W. Swan en 1878, y el norteamericano Thomas A. Edison en 1879 ya habían mencionado y presentado en la sociedad diseños mejorados de bombillas de carbono incandescente. Pero, durante muchísimo tiempo estos inventos estuvieron al alcance de tan solo los más pudientes. Tendrían que generalizarse la producción y distribución de electricidad y perfeccionarse aún más los diseños de aquellas primitivas bombillas para que fueran aparatos cotidianos utilizados dentro de los hogares (Colorado García, 2013).

Iniciando el siglo XXI, los debates entre quemar y respirar, entre tecnologías de combustión y tecnologías limpias se ha convertido en una realidad inédita. Casi cien años de producción de automóviles de combustión nos han dejado aferrados a los beneficios y a las prestaciones de este tipo de transportes, pero como consecuencia se han empezado a sentir y a notar las cosas ocasionadas en el aire y en el agua (Barilá et al., 2013)

Sin embargo, existen tecnologías alternativas, respirables y silenciosas. Las pilas de combustible o las baterías recargables son algunas de las más prometedoras. Se basan en reactores electroquímicos en los que la energía química se convierte directamente en electricidad. La diferencia radica en que en las baterías recargables es la energía química de los materiales que forman los electrodos la que se convierte en electricidad y, una vez esa energía se agota, necesitan un proceso de recarga que regenera la energía química a partir de electricidad. En las pilas de combustible la energía química proviene de un combustible que se alimenta desde el exterior del reactor (Herath et al, 2013).

Después de una etapa inicial de evaluación de ambas tecnologías para aplicación en tracción eléctrica de vehículos, las pilas de combustible están empezando a tomar un gran apogeo. Por ejemplo los carros eléctricos, aunque la pila de combustible será el suministrador de energía principal en el futuro, en el diseño se deben tomar en cuenta otros elementos como baterías para almacenamiento de carga. Las pilas de combustible

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

se han convertido con el tiempo y han dejado de ser simple teoría o simplemente prácticas de laboratorio y no obstante, todavía necesitan de diversas mejoras de materiales y diseños, constituyen una alternativa seria a los ineficientes motores de combustión, una alternativa por la que se interesan tanto la industria del automóvil como las compañías eléctricas y del sector energético (Gómez Romero, 2002).

A lo largo de nuestra evolución tecnológica, los principios científicos básicos de la tecnología de pilas de combustible se descubrieron mucho antes de que sus aplicaciones fueran desarrolladas o tomadas en cuenta. El inglés William Grove, en 1893, en público, logró hacer un experimento que demostraba la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno. Su experimento original resultaba al unir en serie cuatro celdas electroquímicas, cada una de las cuales estaba compuesta por un electrodo con hidrógeno y otro con oxígeno, separados por un electrolito. Grove demostró que la reacción de oxidación del hidrógeno en el electrodo negativo combinada con la de reducción del oxígeno en el positivo generaba una corriente eléctrica que se podía usar a su vez para generar hidrógeno y oxígeno (Gómez Romero, 2002).

2.1.2 Obtención del hidrógeno

Este se obtiene por medio de un equipo electroquímico llamado celda de combustible, que logra romper los enlaces de hidrógeno y oxígeno formados por el agua, esto por medio de la electrólisis, que logra que la molécula de agua H_2O se convierta en HHO , el cual es el que se utiliza como combustible alternativo para cualquier tipo de motor de combustión interna (Ho et al, 2008).

Posteriormente a la electrólisis mencionada en el párrafo anterior, es necesaria la implementación de las pilas de combustible, esto para convertir la energía química contenida en el combustible en energía eléctrica, por medio de otro dispositivo electroquímico, diferente al que utilizan las celdas de combustible, aunque con un mismo

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

principio de funcionamiento (Ho et al, 2008). En teoría el rendimiento alcanzado por este proceso es superior al 50%, o incluso muchas veces dependiendo de la exactitud de los cálculos y de la implementación, sin embargo, en la práctica se demuestran rendimientos del 40 al 50%, pero asemejando esta etapa tan solo a la transformación electroquímica, sin tener en cuenta la posterior combustión (Wang et al, 2014).

Estos dispositivos, pueden funcionar incluso con otros tipos de combustible, eso sí, con la generación de hidrógeno es cuando presenta las mayores facilidades, ventajas y el mayor rendimiento.

2.1.3 La pila de combustible

La pila de combustible (Ver Ilustración 1), tiene una serie de conexiones internas que están dispuestas en serie, donde las células o celdas individuales están formadas por dos electrodos, un ánodo y otro cátodo, donde tiene lugar la oxidación del hidrógeno y la reducción del oxígeno. Adicionalmente, allí tiene lugar el intercambio de los iones que hace posible las reacciones mencionadas anteriormente, esto facilitado por un electrolito (que puede ser un medio ácido o básico).

La canalización de los gases y la circulación de los electrones se hacen por medio de la placa bipolar, que es la unión de cada dos celdas, esto finalmente porque los electrones pasan por circuitos externos (Gómez Romero, 2002).

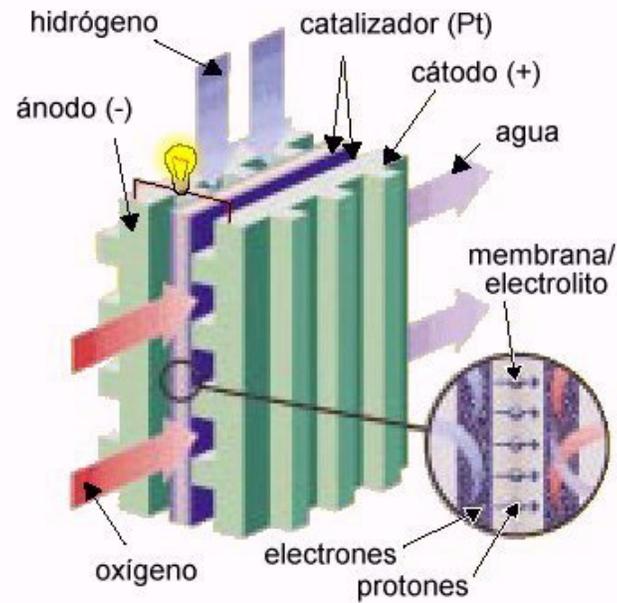


Ilustración 1. Esquema de una pila de combustible (Gómez Romero, 2002)

Según la Ilustración 1, se puede describir el funcionamiento de la pila de combustible así: el hidrógeno fluye hacia el ánodo, donde un catalizador como el platino facilita la conversión en electrones y protones (H^+). Luego, estos atraviesan la membrana electrolítica para combinarse con el oxígeno y con los electrones en el lado del cátodo (esta reacción también catalizada por el platino). Los electrones que no pueden atravesar la membrana de electrolito, fluyen del ánodo al cátodo a través de un circuito externo y alimentan los dispositivos electrolíticos. La celda mostrada en la ilustración 1, produce alrededor de un voltio, sin embargo para aplicaciones de potencia se agrupan muchas de estas celdas para formar la pila de combustible, cuyo voltaje va en aumento con relación a la cantidad de pilas que se dispongan (Vegas Serrano, 2009).

En la Tabla 1, se muestran los principales tipos de pilas de combustible que se utilizan actualmente, algunas de sus características más relevantes, aplicaciones, ventajas y desventajas.

Tabla 1. Principales tipos de pilas combustibles más usadas (Gómez Romero, 2002).

Tipo y siglas	Electrolito	Temperatura (°C)	Combustible	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Poliméricas (PEM)	Nafion	60-100	H_2	Transporte equipos portátiles de electricidad	Baja temperatura, arranque rápido del electrolito sólido (reduce corrosión, figas, etc.)	La baja temperatura requiere catalizadores caros (Pt) y H_2 puro
Alcalina (AFC)	KOH (aq.)	90-100	H_2	Militares especiales	Mejores presentaciones de corriente debido a su rápida reacción catódica	Requiere eliminar CO_2 de aire y combustible
De ácido fosfórico (PAFC)	H_3PO_4	175-200	H_2	Electricidad	Eficiencia de hasta un 85% (con cogeneración de calor y electricidad). Posibilidad de usar H_2 impuro como combustible.	Catalizador de Pt. Corriente y potencia muy bajas. El gran peso y tamaño
De carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Li, Na, K	600-1000	H_2	Electricidad	Mayor eficiencia, posibilidad de usar catalizadores más baratos que el platino y flexibilidad	Las altas temperaturas aumentan la corrosión y la ruptura de componentes

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

					para usar otro tipo de combustibles	
De óxido sólido (SOFC)	(Zr, Y) O_2	800-1000	H_2	Electricidad	Ventajas similares al MCFC. El electrolito sólido reduce corrosión, figas, etc.	Las altas temperaturas facilitan la ruptura de componentes, por ejemplo los sellos
Conversión directa de metanol (DMFC)	Nafion	60-100	CH_3OH	Transporte equipos portátiles de electricidad	Combustible líquido, más cercano a la tecnología actual, más las ventajas de las PEM	

La clasificación de las pilas radica en el tipo de electrolito que se utilice. Actualmente las más utilizadas o de las que más beneficios se espera son la de polímeros, que son aplicadas en automóviles, u otras aplicaciones de baja potencia como transporte, aplicaciones residenciales y algunas aplicaciones portátiles (Gómez Romero, 2002). Así mismo las pilas de óxidos sólidos para generación centralizada o distribuida de electricidad también generan una alta expectativa.

Un esquema básico de un despiece de una pila de combustible puede ser visto en la ilustración 2, donde se pueden notar sus elementos de construcción básicos, la forma de fijación y la disposición de esta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	



Ilustración 2. Despiece de una pila de combustible (Vegas Serrano, 2009)

2.1.3.1 Eficiencia de la pila de combustible

Como se ha mencionado la pila electroquímica es un dispositivo que en su funcionamiento, combina el oxígeno y el hidrógeno, para producir de esta manera electricidad y calor, esto a partir de agua. Mientras se suministra el combustible, la pila se usa para generar la energía (Vegas Serrano, 2009). Ya que la conversión del combustible a la energía generada, a diferencia de los motores de combustión interna actuales, se lleva a cabo por medio del proceso de electrólisis y no por combustión interna. Por ello se puede aseverar que el proceso es silencioso, limpio y se logran grandes eficiencias, más o menos de dos a tres veces mucho más eficiente que las entregadas por la quema de combustible. Los catalizadores desarrollados hasta el momento logran eficiencias de alrededor del 65 y 80% (Colorado García, 2013).

2.1.3.2 Composición

En cuanto a los gases se refiere, su densidad es la más baja posible, y también cuenta con el segundo punto de ebullición más bajo de todas las sustancias conocidas.

Ninguna otra tecnología de generación de energía ofrece la combinación de los beneficios que las células entregan. Además de las emisiones bajas o cero, los beneficios incluyen una alta eficiencia y fiabilidad (Ji et al, 2011). En principio, una celda de combustible opera

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

como una batería, pero a diferencia de una batería, una pila de combustible no se deteriora o requiere recarga. Se va a producir energía en forma de electricidad y calor, siempre y cuando se suministre combustible.

En la Ilustración 3 se puede notar una célula de combustible que consiste en dos electrodos encerrados alrededor de un electrolito. El oxígeno pasa a través de un electrodo y de hidrógeno sobre el otro, la generación de electricidad, agua y calor. El combustible de hidrógeno se alimenta en el ánodo de la pila de combustible. Oxígeno (o aire) entra en la pila de combustible a través del cátodo. Alentados por un catalizador, el átomo de hidrógeno se divide en un protón y un electrón, que toman diferentes caminos hacia el cátodo (Verhelst, 2013). El protón pasa a través del electrolito. Los electrones crean corrientes separadas que pueden ser utilizadas antes de que vuelvan al cátodo, con el fin de reunirse con el hidrógeno y el oxígeno en una molécula de agua.

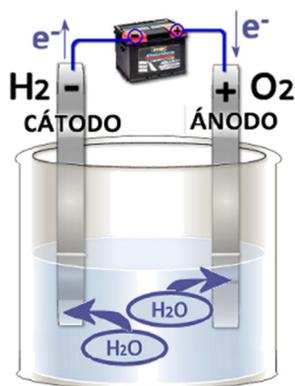


Ilustración 3. Diagrama simplificado de un proceso de electrólisis (Moldrik & Hradilek, 2009)

2.1.4 Aplicaciones

Las pilas de combustible como se mencionó anteriormente son unos sistemas que por su amabilidad con el ambiente ha ido creciendo en aplicaciones y en investigaciones, ya que generalmente se busca esta clase de sistemas, apuntando siempre a una sostenibilidad

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

ambiental, sin embargo, como todos los campos, el hidrógeno y las celdas de combustible tienen problemas e inconvenientes inherentes a su construcción y funcionamiento, así mismo presentan múltiples ventajas que hacen posible su creciente desarrollo (Ji et al, 2013).

2.1.4.1 Electrónica de potencia

Esta aplicación tiene lugar porque se han venido desarrollando sistemas que podrían reemplazar a las actuales baterías de los celulares, cámaras fotográficas o de video, portátiles, entre un sinnúmero de elementos electrónicos. Esto debido a la eficiencia del mismo, y que el precio del producto no es tan elevado como para no tener en cuenta. Una de las formas de utilizar las pilas de combustible en los aparatos electrónicos son recargas periódicas con metanol o con hidrógeno, este último se produciría por electrólisis cuando se conecte al enchufe. Una de las ventajas (hablando de etanol) es que no debemos estar con un cargador para todos lados, no tendríamos que buscar un enchufe, y en otros casos no sufriríamos de la posibilidad de viajar a otro país y encontrarnos con que la disposición de los enchufes es diferente o que la tensión eléctrica con la que trabajan es otra. Sin embargo, solo se tendría que estar pendiente de tener siempre metanol disponible (Gómez Romero, 2002).

2.1.4.2 Aplicaciones en transporte

Hasta el presente se han venido desarrollando vehículos que operan con hidrógeno, cabe señalar que en el almacenamiento de este deben tenerse en cuenta niveles de presión de 300 y 700 bar, o incluso superiores cuando se almacena hidrógeno líquido, es decir, criogénico o bien fijado en algunos componentes con los hidruros metálicos. Este combustible se puede utilizar en pilas de combustible o en motores de combustión interna y se debe a una adaptación que se le hace a los motores tipo Otto que utilizan gasolina como fluido de trabajo. A este tipo de combustible se le han trabajado investigaciones a la par con el GNV (Gas Natural Vehicular), metanol y gasolina; con el fin

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

de aumentar el ahorro y la eficiencia energética o por otra parte, para tratar de desarrollar vehículos integrados, que puedan utilizar todos estos tipos de combustibles, además se debe pensar en que el hidrógeno por su parte se produzca dentro del vehículo (Garzón Tovar, 2013).

La gran ventaja de este sistema, nace del rendimiento entregado por la pila, ya que se ha demostrado que son muy superiores a la de los motores de combustión interna actuales, otra ventaja tiene relación con las condiciones medio ambientales, debido a que este sistema no presenta emisiones. El único problema tiene que ver con el NO_x en el caso de repostar hidrógeno y tener motor de combustión, y sólo CO_2 en el caso de repostar otro combustible y tener pila de combustible, y en menor medida por la alta eficiencia del sistema. Una de las ventajas que puede ofrecer un vehículo operando con base en hidrógeno frente a uno operando con gasolina, es la seguridad, esto anteriormente demostrado con todo tipo de ensayos de impacto, balazo y accidentes provocados (principalmente por la alta fugacidad del hidrógeno). Por otro lado, trabajar con hidrógeno puede traer ciertas desventajas, entre ellas que con un depósito del mismo tamaño y volumen se alcanza una autonomía muy inferior o en el caso de embarcar otro combustible, hay que integrar otro equipo en el vehículo para la obtención del hidrógeno. Esto haciendo que el peso total del sistema aumente mucho (Utrilla, 2008).

2.1.4.3 Otras aplicaciones

Una de ellas son las aplicaciones residenciales, es una de las aplicaciones menos conocida, pero es una tecnología que por medio de la pila de combustible y el gas natural, puede producir la electricidad necesaria para iluminar completamente toda una casa familiar. Estos sistemas pueden lograr eficiencias incluso mucho mayores que las grandes plantas de producción de electricidad, incluso porque se ahorran las pérdidas en el transporte de la electricidad. No obstante, el gran problema sería la inversión (Zhang et al, 2011).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

Algunos tipos de pilas de combustible, generalmente las que desarrollan altas temperaturas, pueden llegar a competir con las plantas de ciclo combinado para la generación de electricidad, cuando las investigaciones y las implementaciones alcancen un grado de madurez mucho mayor.

Lo anterior expuesto es real, aunque sólo son proyecciones futuras debido al bajo desarrollo de esta tecnología, ya que es difícil encontrar equipos que puedan garantizar un número de horas de funcionamiento como para competir con las tecnologías asentadas, y el costo de cualquier equipo es muy alto. Por otra parte, del almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones en transporte se puede decir algo muy similar, porque todavía no existen sistemas que puedan competir en igualdad de condiciones con los sencillos depósitos de gasolina (NewCarShow.com, 2011).

2.1.5 Almacenamiento del hidrógeno

Para habilitar el almacenamiento de la energía eléctrica utilizando las tecnologías del hidrógeno y para permitir la utilización simultánea de las fuentes de RES (Energías Renovables Libres de Emisiones), el hidrógeno se produce por aplicación de la electrólisis del agua. Esto significa que la energía eléctrica producida por una unidad RES (por ejemplo, la planta de energía eólica) se utiliza para la producción de hidrógeno a partir de agua dentro de un dispositivo llamado electrolizador, y que se haga cada vez que la carga del sistema de energía eléctrica se ha reducido (Bixler, 2012). El hidrógeno se almacena dentro del depósito hasta un aumento de la carga eléctrica del sistema de potencia, para ser utilizado para la producción de energía eléctrica dentro de una célula de combustible, cuyos productos incluirán agua y el calor (Garzón Tovar, 2013). El hidrógeno se utiliza luego como un medio para transmitir la energía, no una fuente de la misma. En la Ilustración 4 se puede notar un sistema de almacenamiento básico de hidrógeno.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

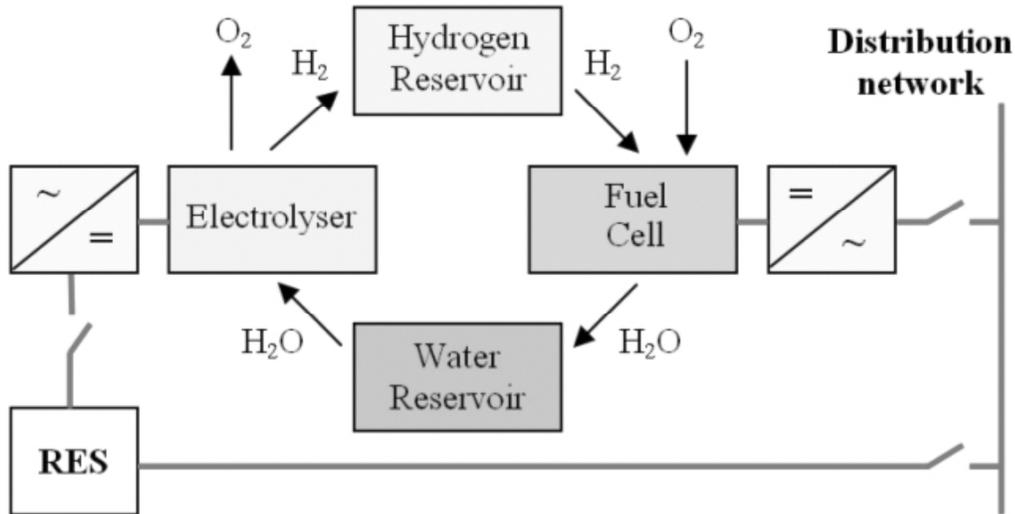


Ilustración 4. Diagrama del sistema de almacenamiento de hidrógeno (Moldrik & Hradilek, 2009)

2.1.6 Consideraciones

Las pilas de combustible pueden utilizarse tanto en aplicaciones estacionarias como móviles; en los sistemas de acumulación, se puede considerar una aplicación estacionaria. Para ser más específicos, se refiere a la operación a largo plazo de las células de combustible, en su mayoría a potencia nominal con arranques frecuentes. Además, en cumplimiento con el requisito para una máxima eficiencia y fiabilidad. Debido a que todavía son bastante altos los costos de capital específicos, la vida útil de la pila de combustible y la degradación relacionada siguen siendo interesantes (Herath et al, 2013).

El hidrógeno presenta una desventaja en cuanto a los combustibles fósiles, ya que se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente, por lo que, si un tanque es llenado con H_2 , albergaría mucho menor cantidad de combustible que si se llenara con gasolina. Esto a consecuencia de que en términos de densidad de energía, es decir, la relación entre energía y volumen, significa que el hidrógeno tiene un menor contenido energético con respecto al combustible tradicional. De esta manera, en condiciones ambientales, y en relación con el volumen ocupado, el hidrógeno proporciona menos energía que la

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

gasolina, lo cual lo hace ineficiente, por lo que el almacenamiento se convierte en el gran problema de esta tecnología. Por esto, para su uso como combustible vehicular, el hidrógeno deberá ser excesivamente comprimido, casi hasta 500 bar, o almacenado en forma líquida a $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas dos alternativas significan claras desventajas de costo energético elevado, por lo que el empleo de cilindros de acero reforzado que permitan alcanzar dichas presiones son necesarios, por lo que causan un aumento significativo del peso del vehículo, y se pierde alrededor del 30% de la energía química del H_2 en el estado gaseoso, esto debido al proceso de licuefacción (Garzón Tovar, 2013).

2.2 Comparación del hidrógeno con otros combustibles

En la Tabla 2 se presenta una comparación del hidrógeno como combustible con otros tipos de combustible utilizados actualmente, donde se pueden observar algunas características en particular, sabiendo que muchas de ellas puede representar una ventaja o una desventaja con respecto a los otros, sin embargo cabe anotar que cada una de las características expuestas en la tabla 2 son inferidas a partir de pruebas de laboratorio y pruebas experimentales.

Tabla 2. Propiedades energéticas del hidrógeno comparado con otros combustibles (Vegas Serrano, 2009)

	hidrógeno	gasolina	metano
Poder calorífico inferior (KJ/gr)	120	43	50
Densidad gas (Kg/Nm³)	0.090	NA	0.717
Densidad energética gas	10.8	NA	35.8
Densidad liquido (Kg/L)	0.071	0.733	NA
Densidad energética liquido (MJ/l)	10.8	31.5	NA
Límites de inflamabilidad (%)	4.0 - 75	1.0 - 7.6	5.3 - 15.0
Límite de detonación (%)	18,3 - 59	1.1 - 3.3	6.3 -13.5
Mínima energía de activación (Mj)	0.02	0.24	0.29
Temp. De comb. Espontanea (K)	858	501 - 744	813
Emisiones (mg CO₂/KJ)	0	80	55
Visibilidad de la llama	no	SI	SI
Toxicidad (combustible y emisiones)	no/no	SI/SI	SI/SI

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

2.3 Hidrógeno vs otro combustible.

Para explorar las posibilidades comerciales de la producción de hidrógeno por electrólisis del agua para su uso como combustible sustituto, en 1942, el Gobierno de Queensland instruyó a J.S. JUST de la división de ingeniería de un Instituto de Australia, quien preparó un informe preliminar frente a la posibilidad de la producción de hidrógeno mediante electrólisis de pico de la capacidad de la planta de energía eléctrica existente en Brisbane; pero los resultados fueron negativos, ya que el aporte de energía que se debía invertir en la producción de hidrógeno era mayor a la cantidad obtenida en forma del mismo, pero representaba una gran ventaja en cuanto a gases contaminantes (Just, 1943)

En 2007 se desarrolló un prototipo de una motocicleta, ya no con celda de hidrógeno en la cual se usa el gas como el combustible impulsor, sino con pila de combustible donde se usa el gas para alimentar una pila, esta pila o batería es la que se encarga de generar la energía eléctrica suficiente para mover un motor eléctrico que es al final el que se encarga de mover la moto, este experimento fue todo un éxito ya que la motocicleta se desplazó con eficiencia, como resultado obtuvo cero emisiones contaminantes y bajo ruido, este prototipo se llamó "píos" (Weigl et al., 2008)

Como fuentes de energía eléctrica limpia y eficiente, las pilas de combustible de hidrógeno tienen una gama de aplicaciones vehiculares y han sido considerados como elementos prometedores para la utilización de energía eléctrica renovable en aplicaciones de automoción (Thanapalan, 2011).

Millones de motos en las ciudades del sureste asiático crean la mayor parte de la contaminación acústica y del aire en las ciudades a causa del tráfico. Una de las

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

alternativas para resolver esas contaminaciones es diseñar un prototipo de pila de combustible de hidrógeno, y para ello se construyó la "*Powered* motocicleta" que es libre de emisiones, tiene un nivel de ruido muy bajo, y es capaz de hacer frente a la variedad y el rendimiento de las motocicletas que se utilizan actualmente en esta zona (Dieteret al, 2013).

2.4 Sistemas de almacenamiento del combustible

Actualmente los sistemas de almacenamiento novedosos se han venido desarrollando y uno de los más llamativos utiliza los materiales conocidos como redes metal-orgánicas, o *Metal Organic Frameworks* - (MOF). Los MOF son sólidos híbridos cristalinos con infinitas redes poliméricas tridimensionales construidas a partir de un proceso de auto ensamblaje entre iones metálicos y ligados orgánicamente, para así almacenar hidrógeno en sus poros. El empleo de MOF como sistema de almacenamiento de hidrógeno se debe a que representan características deseadas, como elevada área superficial y gran tamaño de poro, lo que permite que haya un proceso de fisisorción en el cual, las moléculas de H_2 son adsorbidas en la superficie de los poros mediante fuerzas intermoleculares (Just, 1943). Por lo tanto, su elevada área superficial y porosidad permiten que los MOF funcionen como tanques moleculares para el almacenamiento de hidrógeno en los vehículos, este sistema poroso se puede ver en la Ilustración 5.

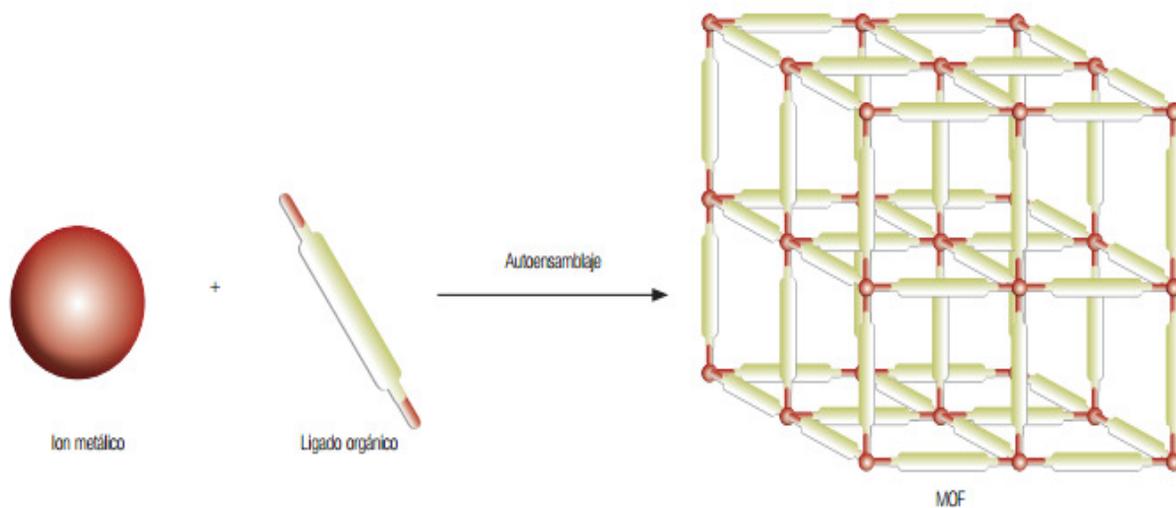


Ilustración 5. Unidades elementales de las redes metal-orgánicas (Garzón Tovar, 2013)

2.5 Impacto ambiental

Una de las tendencias mundiales en investigación trata la creciente necesidad de conservar el medio ambiente y tratar que las nuevas tecnologías aporten su trabajo en torno a esta tarea. Los avances tecnológicos de la antigüedad aunque trajeron beneficios en cuanto al desarrollo y evolución de la humanidad, no se hicieron a menos que las consecuencias ambientales presentes fueran favorables. El desarrollo del motor y demás aplicaciones del hidrógeno como combustible también fueron acogidas por estas restricciones o necesidades medioambientales (Bixler, 2012).

El hidrógeno no es una fuente de energía sino un vector energético, y por esto el nivel de contaminación o la amabilidad con el medio ambiente del hidrógeno, parte de la fuente de energía de la cual se obtenga este componente. Hasta el 2010 alrededor del 95% de la producción de hidrógeno se hacía a través de la inflamación de combustible fósil, por lo que las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera eran equivalentes a los sistemas de combustión con quema de gasolina. Hasta esa fecha solo un 5% de la obtención de hidrógeno se hacía mediante la electrólisis, es decir, como se refiere el trabajo anterior, a

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

la obtención de hidrógeno mediante la separación de moléculas del agua, al aplicar cierta cantidad de corriente eléctrica (Acosta, 2010). Cabe destacar que este método es mucho menos eficiente, que si se utiliza la energía eléctrica directamente, pero de esta manera es muy complicado el almacenamiento del hidrógeno. Por eso la electrólisis presenta grandes ventajas como lo son, por ejemplo, generar energía aunque en ese momento no haya demanda de esta y finalmente recuperarla en momentos de escasez (Ji & Wang, 2009).

Sin embargo, a partir del año 2010, comienza a crecer la popularidad del hidrógeno como notable fuente de combustible, idealmente sustentable. Por esta razón se han llevado a cabo investigaciones que apuntan a resultados, como si las fuentes de combustible por hidrógeno pueden lograr revertir el daño hecho por las fuentes de combustible fósil. Las empresas de automóviles actuales están desarrollando tecnologías que apuntan a la generación por medio de motores híbridos, que puedan utilizar a la par el combustible fósil y el combustible de hidrógeno. Las células del combustible de hidrógeno se combinan con el oxígeno del aire, lo que produce energía para encender un motor y emitir solamente agua de un tubo de escape (Garzón Tovar, 2013).

Al final, el impacto a largo plazo que tiene el uso de hidrógeno como un combustible a nivel mundial permanece como una especulación. Las consecuencias conocidas del hidrógeno afectando la atmósfera del planeta vienen de una investigación terminada por el Instituto de Tecnología de California, en 2006. De acuerdo al estudio, los resultados de la fuga de hidrógeno prevista hecha por los vehículos, manufacturación de hidrógeno y transporte del gas elemental no son buenas noticias para el planeta. Los científicos del Instituto de Tecnología vieron el estudio como un medio para identificar los problemas ambientales potenciales antes de que ocurran (Bixler, 2012).

Por otro lado, cabe aclarar que si la fuente de energía de la electrólisis para generar hidrógeno es proveniente de fuentes renovables como lo son la energía eólica o energía

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

solar, se obtendrán finalmente índices de contaminación ambiental muy insignificantes, con altos vectores de generación de energía (Ji et al, 2013).

2.6 Combustión del Hidrógeno en motores de combustión interna.

Las pilas de combustible alimentadas por hidrógeno son silenciosas y, además de electricidad y calor, solo producen agua como residuo. El cambio progresivo de vehículos con motores de combustión interna por vehículos de motor eléctrico alimentados por pilas de combustible hará por tanto de nuestras ciudades lugares más saludables y silenciosos. Aunque estos vehículos eléctricos todavía no son rentables, en todos los países industrializados se están llevando a cabo esfuerzos de financiación de proyectos de demostración como por ejemplo en autobuses no contaminantes (Ji et al, 2013).

Desde otro punto de vista, el rango de inflamabilidad del hidrógeno es mucho más amplio que el de los hidrocarburos por lo que es posible el funcionamiento con mezclas muy pobres sin que se produzcan ausencias de encendido. Las mezclas combustibles de hidrógeno y aire pueden ser pobres, y presentar inestabilidad de llama. Esta particularidad hace que sea posible regular un amplio rango de potencia modificando la mezcla sin necesidad de estrangular la admisión con el consiguiente aumento de rendimiento operando a carga parcial (Just, 1943).

El hidrógeno tiene un poder calorífico muy alto (119.88 MJ/kg) a pesar de esto, un motor operando con hidrógeno sólo podría alcanzar aproximadamente 80% de la potencia alcanzada como por ejemplo con el nafta debido a su baja densidad, el combustible ocupa un gran volumen del cilindro. Esta comparación se realiza sin tener en cuenta que debido al alto número octánico del hidrógeno, podría aumentarse notablemente la relación de compresión, aumentando el rendimiento y por lo tanto la potencia entregada (Bixler, 2012).

Durante el llenado del cilindro ingresa una cantidad de hidrógeno muy pequeña en masa haciendo que la potencia sea muy baja. El problema de retroceso de llama se ha abordado

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

de diferentes maneras en los motores que utilizan este combustible, una de ellas es la inyección directa en cámara de combustión, en este caso, se resuelven dos problemas simultáneamente, ya que se aspira sólo aire durante el proceso de admisión, diluyendo y refrigerando los gases residuales. Luego, durante la etapa de compresión, se inyecta el hidrógeno a presión dentro del cilindro. De esta manera, se resuelve el problema de retroceso de llama y también el de la merma de potencia ya que el motor aspira solo aire, se logra en este caso una potencia mayor, con un incremento del orden del 15% en la eficiencia (Ji, Wang & Zhang, 2011).

Otra técnica tiene que ver con aspirar aire puro en la primera etapa del proceso de admisión, luego inyectar hidrógeno en cercanías de la válvula y posteriormente seguir aspirando aire hasta el final del proceso de llenado del cilindro. La primera etapa en la que solo ingresa aire, diluye y refrigera los gases residuales permitiendo que al ingresar hidrógeno, no existan condiciones de auto explosión (Barilá, et al., 2013).

2.6.1 Modificaciones a un motor para usar combustible

Pueden realizarse modificaciones como por ejemplo: en el tubo de admisión deben instalarse dos inyectores, los mismos se ubican lo más cerca posible de la válvula de admisión para facilitar la implementación de la estrategia de inyección secuenciada evitando lo más posible la dilución con el aire que se encuentra en el tubo de admisión en el recorrido del combustible desde el inyector hasta entrar en el cilindro. Se debería instalar un codificador angular electrónico “*encoder*” en el cigüeñal con el propósito de contar con una referencia precisa de la posición angular del mismo. Este emite dos salidas digitales, una de ellas entrega un pulso por cada vuelta de giro y los otros 360 pulsos por vuelta. Ambas son utilizadas para poder relevar con precisión la presión en el cilindro, tarea para la que es necesario contar con gran precisión angular ya que esta influye

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

notoriamente en los cálculos de trabajo indicado y en el estudio de diversos parámetros de interés en la evaluación del proceso de combustión (Ji & Wang, 2009).

2.7 Partes del motor de hidrógeno

Junto con el biodiesel, los motores de hidrógeno son los mayores exponentes de vehículos ecológicos que existen actualmente (Ji et al, 2011), en la Ilustración 6 se puede ver un esquema básico del montaje de este tipo de motor.

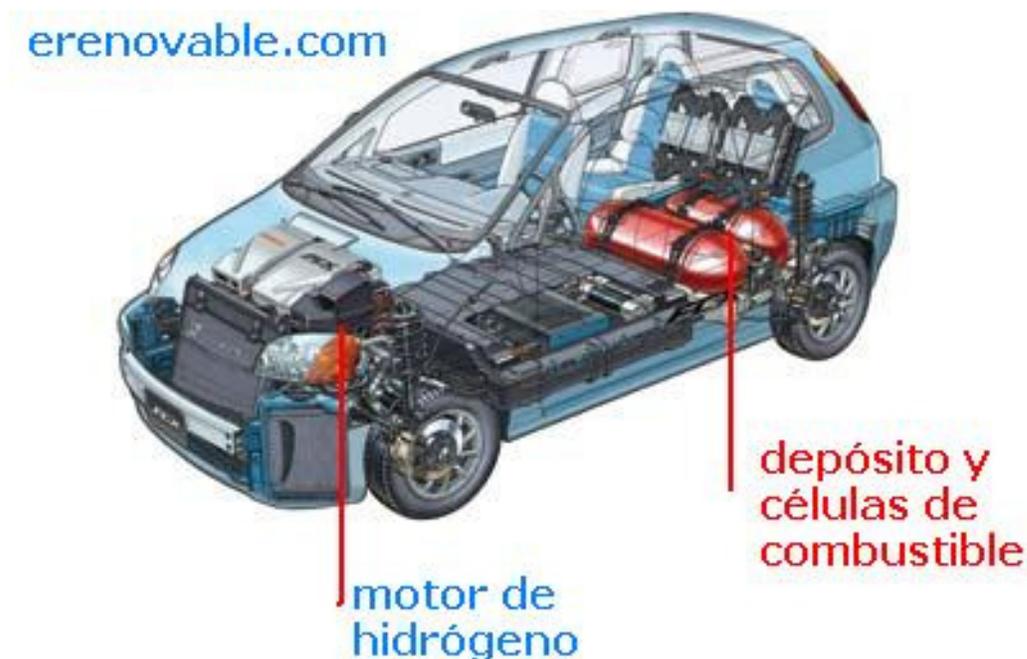


Ilustración 6. Esquema básico de los componentes de un vehículo a base de hidrógeno (Utrilla, 2008)

Adicional a lo anterior, el motor de hidrógeno esencialmente está compuesto de dos partes principales: la primera tiene relación con la parte formada por las células de combustible o pilas de combustible que son las encargadas de producir la electricidad a partir de hidrógeno, la otra parte es el motor eléctrico que hace posible el movimiento del coche (Ho et al, 2008). El motor eléctrico mostrado en la Ilustración 7 es habitual en

nuestro entorno, puesto que es usado en multitud de electrodomésticos y todo tipo de accesorios habituales en nuestra vida cotidiana, es decir, que la parte difícil del motor de hidrógeno es la primera de la que habla sobre la obtención del hidrógeno y la del montaje de las células de combustible.

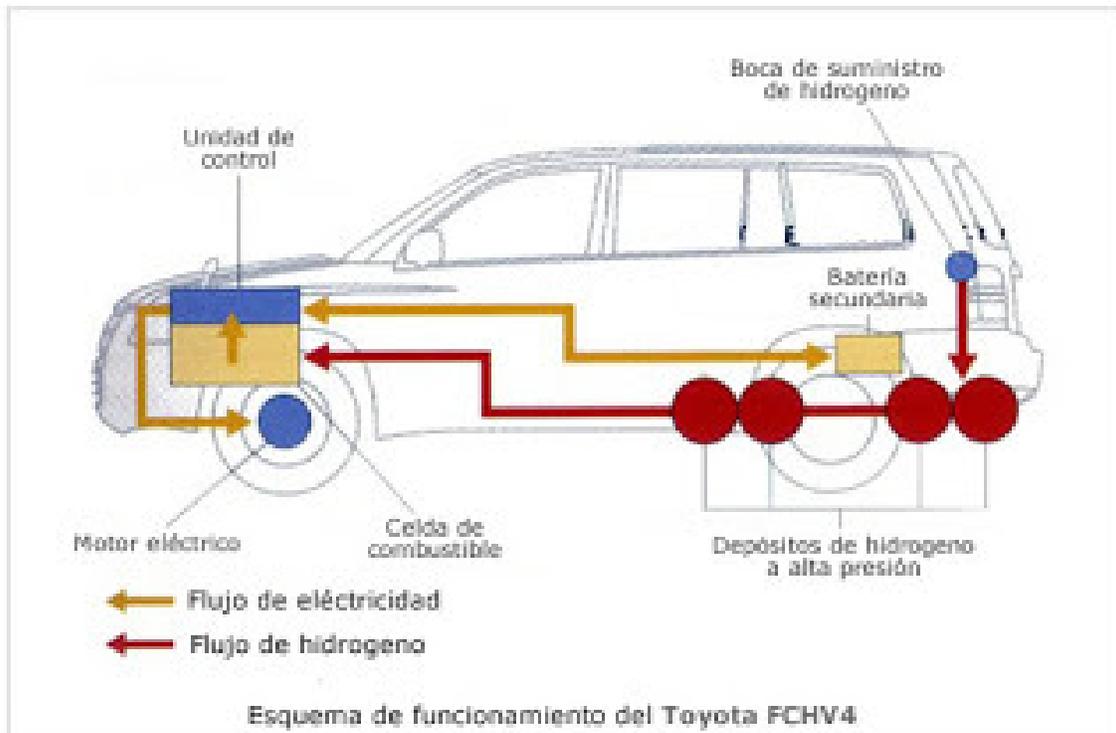


Ilustración 7. Partes de un motor de hidrógeno (Utrilla, 2008)

Finalmente en la Ilustración 7 se puede notar el funcionamiento real de los motores de hidrógeno, mostrando especialmente el funcionamiento de los flujos principales, es decir, el flujo de hidrógeno y el flujo de la electricidad, que son realmente los fluidos de trabajo más importantes y sobre los que se deben centrar todos los trabajos, porque finalmente la obtención de estos hace que el trabajo de una pila de combustible, de una unidad de control, de un motor eléctrico, entre otros, pueda ser posible (Ji et al, 2011).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

2.8 Proyectos actuales de motores de combustión interna operando con hidrógeno.

Han sido numerosos los proyectos y las aplicaciones que se han venido adelantando en torno a los motores de hidrógeno como combustible, debido a que se ha querido incentivar la conciencia ambiental desde los fabricantes hasta los consumidores, por eso a continuación se mencionan entre tantas aplicaciones, algunas de las que se han venido desarrollando, o están funcionando en la actualidad (Mejía & Acevedo, 2013).

2.8.1 Mercedes F125

Su nombre se deriva de los 125 años de los automóviles de Mercedes Benz, éste es presentado como un visionario desarrollo hacia el futuro, ya que desarrolla tecnologías en los componentes. La investigación hacia el futuro, tiende a preparar un camino hacia la implementación de un concepto revolucionario.

Este tipo de motor trabaja bajo la concepción del hidrógeno, sabiendo que es el combustible del futuro. Por esta misma razón el visionario vehículo mostrado en la Ilustración 8, debería estar lanzándose en el año 2025.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	



Ilustración 8. Mercedes F125 (NewCarShow.com, 2011)

2.8.2 Hidrógeno como combustible para transbordadores y aviones

Con este proyecto se pretende aplicar los resultados de la electrólisis del agua para lograr colocar en funcionamiento los aviones y transbordadores espaciales, pensando desde el punto de vista ecológico. Esta idea como todas, surge de la gran necesidad de trabajar alrededor de la sostenibilidad ambiental y la reducción de las emisiones peligrosas para el ambiente.

El resultado del proceso de electrólisis finalmente se verá plasmado en la propulsión de turbinas, por lo que se trata minuciosamente por medio de, por ejemplo, transformadores de voltaje se pueden lograr potencias mayores, para que la electrólisis de como resultado una cantidad mucho más considerable de hidrógeno (Colorado García, 2013).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

2.9 Proyecciones del uso de combustible en el Valle de Aburrá

Junto con el resto del mundo, Medellín no es la excepción, en cuanto al padecimiento de los problemas ambientales, esto es notable desde la perspectiva climática y de los niveles de contaminación vistos en la atmósfera. Por esta razón, se han creado ideologías que pretenden llevar a cabo aplicaciones en este campo, con una proyección para el 2025, más específicamente en el transporte antioqueño.

Entre todos los problemas y beneficios argumentados en el texto anterior, es inminente que para una aplicación en nuestra ciudad se deban tener en cuenta todos estos factores, debido a que ellos pueden afectar un desarrollo efectivo de las visiones planteadas alrededor de la implementación de hidrógeno como combustible, para los vehículos de la ciudad. Adicional a esto se requiere una infraestructura que soporte la distribución y la producción del hidrógeno, que supla con las necesidades de los vehículos actuales y futuros del Valle de Aburrá. Por esta razón para este año se debe esperar que se implementen sistemas de Metano con vapor, para producir hidrógeno, carro tanques para la distribución, sistemas de almacenamiento adecuados y estaciones de suministro que puedan con la demanda de los vehículos que utilicen hidrógeno para esa fecha (Mejía & Acevedo, 2013).

Sin embargo, las tarifas de producción de hidrógeno están muy relacionadas a la producción de energía eléctrica y gas natural. Por esta razón, en gran medida, el costo del hidrógeno estará enlazado a los costos y alzas de los precios de la energía y del gas natural. No obstante, para la producción de hidrógeno también se tiene en cuenta el desarrollo de las energías sustentables, por lo que en Medellín se crea una idea de proyectar esta ideología e incorporar un desarrollo sostenible y unas nuevas tecnologías que puedan fortalecer su uso a partir de energías como lo son la obtenida del viento, de la fuerza del agua y del sol (Mejía & Acevedo, 2013).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

3. METODOLOGÍA

Este capítulo contiene la evaluación experimental, las modificaciones y adaptaciones para el funcionamiento en modo dual del motor.

La fase experimental se llevó a cabo en el centro de servicio automotriz para evaluaciones tecno-mecánicas llamado Bancautos, ubicado en la calle 30 con la 65 en Medellín. Para la evaluación experimental se utilizó un carro Renault 6 con las características mostradas en la tabla 3. En el motor se cambiaron las 4 bujías que eran tipo frío por unas tipo caliente, con el fin de que estas resistan la alta temperatura que genera el hidrógeno durante la combustión.

Tabla 3. Características del motor usado. Fuente: Elaboración propia

Motor del carro Renault 6	
Cilindros	4 cilindros
Cilindraje	1600 cc
Modelo	1977

Posteriormente se cambió el agua refrigerante del motor por un líquido refrigerante industrial Frioxide que tiene la característica de ser refrigerante y anticorrosivo, se evapora a 126 °C que es superior al punto de ebullición del agua.

Para la instalación de la celda en el chasis del vehículo se hicieron dos perforaciones de $\frac{3}{16}$ " para el anclaje de la celda cerca del motor como se muestra en la ilustración 9. Se realizó una perforación extra en el cartucho del filtro de aire con una rosca de $\frac{1}{4}$ " NPT para instalar

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

un racor tipo OD con manguera Hi-Flex para conectar la admisión del hidrógeno, como se muestra en la ilustración 10.



Ilustración 9. Instalación de la celda de combustible en el chasis del carro. Fuente: Elaboración propia

Para la alimentación eléctrica de la celda, la cual produce $2 \frac{l}{min}$ con un consumo de 15 A y 12 VDC, se instaló un relé de dos contactos de 20 A y con una bobina de 12 VDC que es alimentada a través de un interruptor de uso automotriz de 12 A, este a su vez se instaló al lado de la cabrilla del conductor con el fin de alimentar la bobina que le da paso a la celda.



Ilustración 10. Perforación del filtro de aire para la adición de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se instaló un recipiente que almacena el agua y el electrolito (soda cáustica), el cual se puede ver en la ilustración 11 y donde por gravedad el agua y el electrolito cae a la celda la cual hace el proceso de electrólisis y envía ambos gases de nuevo al tarro, para hacer un burbujeo para evitar la retro llama y para que por el orificio superior salga el gas generado.

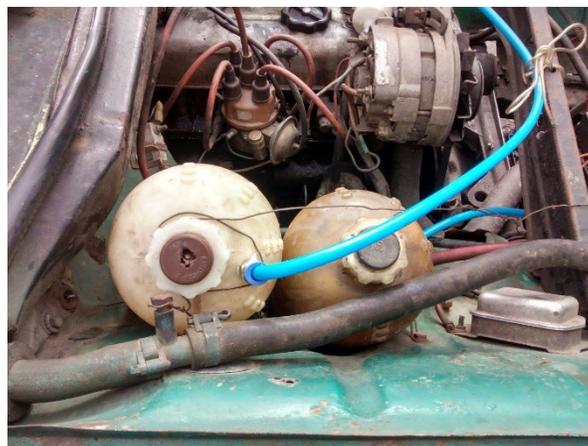


Ilustración 11. Recipiente de almacenamiento del agua y del electrolito. Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación experimental se usó el arreglo experimental mostrado en la ilustración 12.

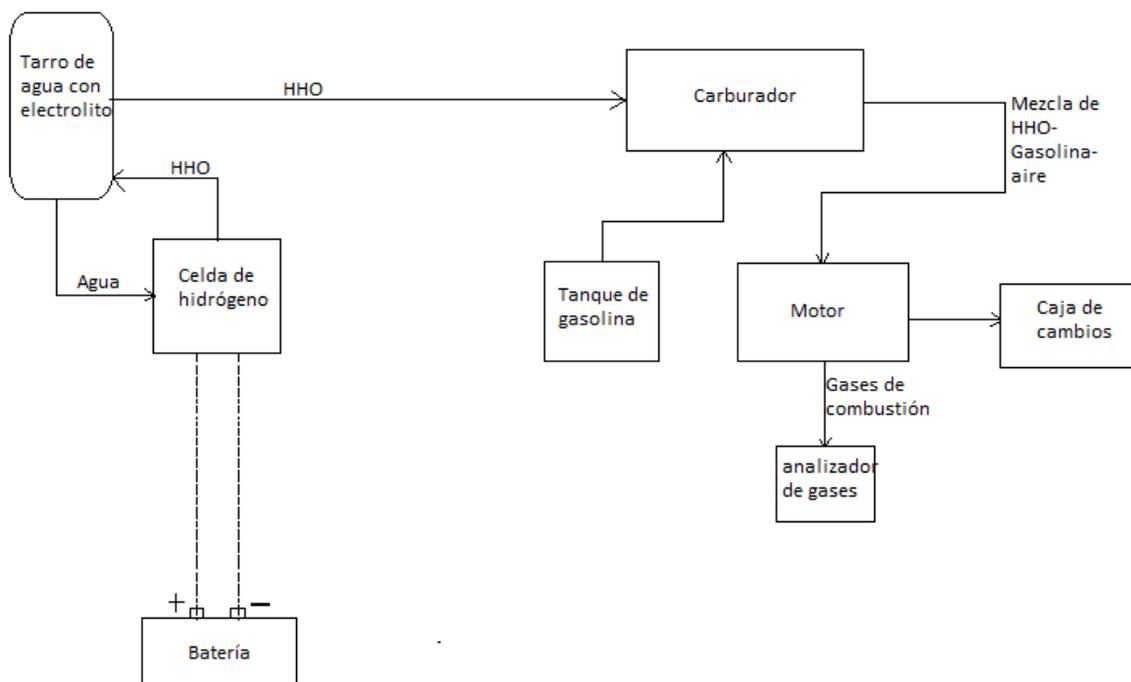


Ilustración 12. Modelo experimental. Fuente: Elaboración propia

Finalmente para la recolección de datos se usó el diseño experimental mostrado en la tabla 4.

Tabla 4. Diseño experimental para recolección y análisis de datos Fuente: Elaboración propia

Factor	Nivel de referencia	Valor real
Tiempo de prueba	1	5 min
	2	10 min
	3	15 min
	4	20 min
Recorrido (km)	1	40 km
	2	80 km
	3	120 km
	4	160 km
Adición de hidrógeno (l/min)	1	2 l/min

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

- **Evaluación ambiental del motor en modo dual hidrógeno y gasolina**

Para lograr la evaluación ambiental del motor en modo dual, se instaló un analizador de gases modelo B90-4001 de BEAR Engineering, inc., a la salida del mofle del carro como se muestra en la ilustración 13.

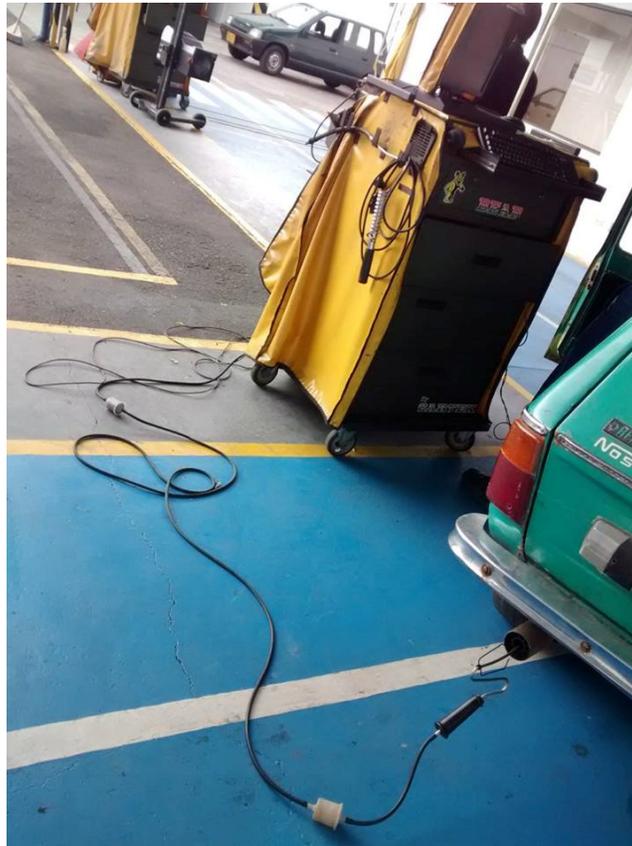


Ilustración 13. Instalación del analizador de gases en el mofle del carro. Fuente: Elaboración propia

- **Medición del consumo de combustible del motor con la adición de hidrógeno a este.**

Para adicionar hidrógeno, primero se redujeron los “boquereles” del carburador del carro de 20 centésimas a 10 centésimas de milímetros en el diámetro de paso de combustible

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

con el fin de reducir el paso de este. Como el motor no se auto regula, se debe hacer esta modificación para que pueda funcionar con hidrógeno en modo dual.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluar experimentalmente las modificaciones y adaptaciones

Las adaptaciones y la instalación de todos los elementos de generación de hidrógeno y de adición de este al motor funcionaron como se esperaba, produciendo los $2 \frac{l}{min}$ para los cuales está diseñada la celda y el motor presentó un buen funcionamiento al restringir el paso de combustible, lo que comprueba que la sustitución de combustible por hidrógeno logró el objetivo trazado.

El sistema experimental se resume de la siguiente manera:

En la ilustración 14 se nota la celda instalada dentro del vehículo, como esta no tiene elementos móviles y adicional a esto no genera vibraciones adicionales, las cuales en ambos casos son de 45 db, no afecta los demás componentes del carro.



Ilustración 14. Celda de combustible fijada y funcionando. Fuente: Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

En la ilustración 15 se nota la conexión de la celda la cual puede ser alimentada por medio de la batería del carro, sin demandar mucha corriente, por lo que no implica problemas para descargar la misma.

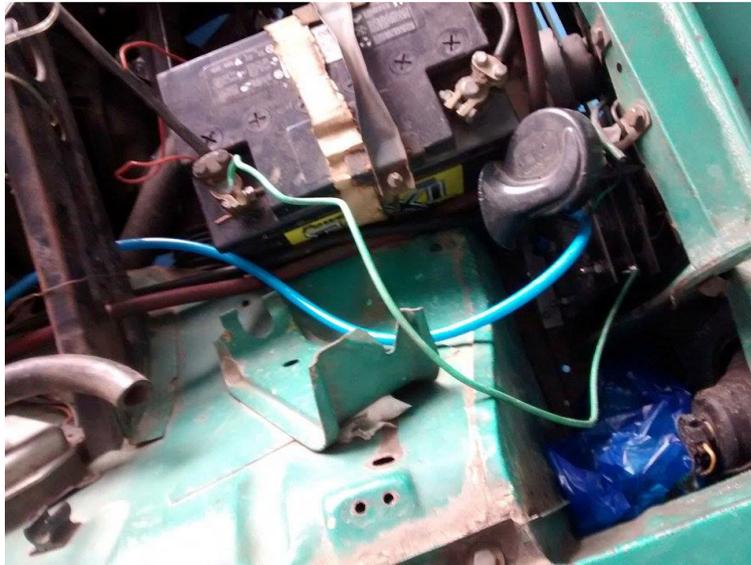


Ilustración 15. Conexión de la celda a la batería. Fuente: Elaboración propia

Finalmente se puede señalar que con las modificaciones hechas el vehículo funcionó como se esperaba, ya que éste fue probado durante 4 horas seguidas sin apagarse o sin mostrar defectos en el funcionamiento. De las 4 horas de prueba, las dos primeras se usan para esperar la estabilización de la celda y del motor, esperando así que la temperatura y la presión sea óptima para que la potencia y la eficiencia llegue hasta su tope; las otras dos horas de prueba fueron utilizadas con el fin de recoger los datos suficientes para la prueba. Luego, se midió la temperatura de las emisiones (de las que se hablará líneas abajo), las cuales aumentaron solo en 10 °C debido a la adición de hidrógeno y a pesar de la antigüedad del carro este respondió bien a los cambios de velocidades y a las exigencias del camino.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

4.2 Evaluar el rendimiento ambiental del motor en modo dual hidrógeno y gasolina

En la tabla 5 se resume la normatividad vigente en Colombia para emisiones de gases contaminantes de vehículos con ciclo Otto.

Tabla 5. Normatividad para emisiones contaminantes en vehículos con ciclo Otto (Ministro de ambiente, 2008)

	Temperatura (°C)	RPM	CO (%)	CO ₂ (%)	HC (PPM)
Ralentí	87	778	4.00	7.00	650
Crucero	87	2625	4.00	7.00	650

En la ilustración 16 se muestra una fotografía tomada a la pantalla del analizador de gases que efectuó la prueba de emisiones del carro, las rpm a la que se sometió la operación y el tiempo que duró esta.



Ilustración 16. Pantalla del analizador de gases mostrando las condiciones del análisis. Fuente: Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

Luego, un promedio de emisiones entregado por el analizador, se puede ver en la tabla 6. Allí se hace un análisis comparativo de las emisiones para el vehículo sin y con modificaciones.

Tabla 6. Resultados del analizador de gases. Fuente: Elaboración propia

Pruebas	Temperatura (°C)	Presión (psi)	HC (PPM)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Con modificaciones	51	639	301.67	3.44	10.85	3.041
Sin modificaciones	45	639	379.67	4.475	13.888	4.01

La tabla 6 demuestra que el CO₂ en vez de disminuir está por encima de la norma, pero esto se debe a que el motor de este carro es viejo y por lo tanto su eficiencia ambiental se ve afectada por los años de trabajo del carro, es decir, por el desgaste en los sistemas de admisión, en los sistemas mecánicos con movimiento rotatorio y alternativo, y en la sincronización de las válvulas, cigüeñal y bujía; además, el desconocimiento del impacto ambiental en el tiempo de la construcción del carro juega un papel esencial, ya que los diseños se basaban en una alta relación de aire/combustible a lo que se puede referir como un aspecto no negativo, debido a que las emisiones de CO no ascendieron. Sin embargo, se nota un efecto positivo al realizar modificaciones al auto, con esto se reducen las emisiones de CO₂ en un 21.875% respecto de los valores obtenidos en su estado inicial. El resto de gases de emisiones se mantienen por debajo de la norma.

En la ilustración 17 se muestra una gráfica de la variación de emisiones de HC en los 20 minutos de las pruebas con el analizador. Los datos eran entregados al menos cada dos minutos y la variación ascendente y descendente se debe a la prueba con la aceleración del motor y aunque se reduzcan estas emisiones con la adición de hidrógeno, no se eliminan totalmente debido a que no se reemplaza el 100% del consumo de gasolina.

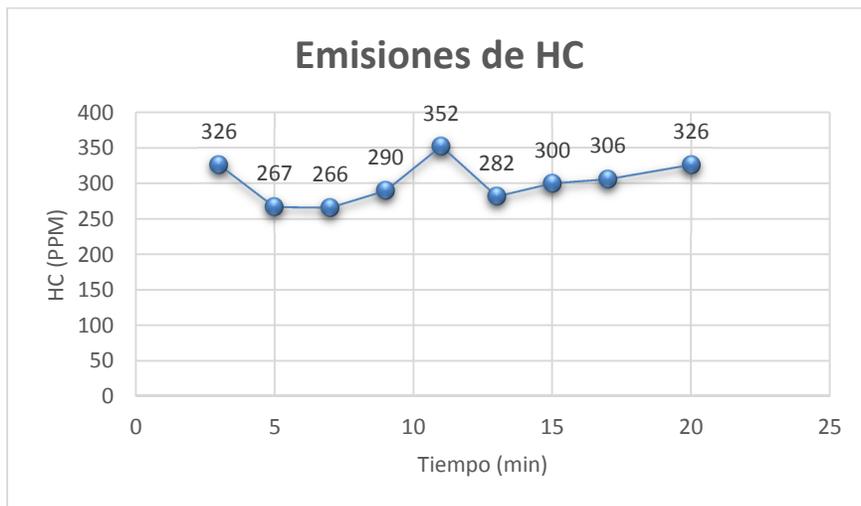


Ilustración 17. Emisiones de HC. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 18 se pueden notar las emisiones de CO, es bien sabido que esta molécula se genera a partir de la descomposición parcial de los hidrocarburos con el oxígeno, en estas pruebas experimentales se encontró un aumento después de los 11 minutos, debido a que en este tiempo se aumentó la velocidad y hubo variación en el dosado (a causa de las restricciones en el sistema de admisión) que contribuye con el oxígeno de la molécula.

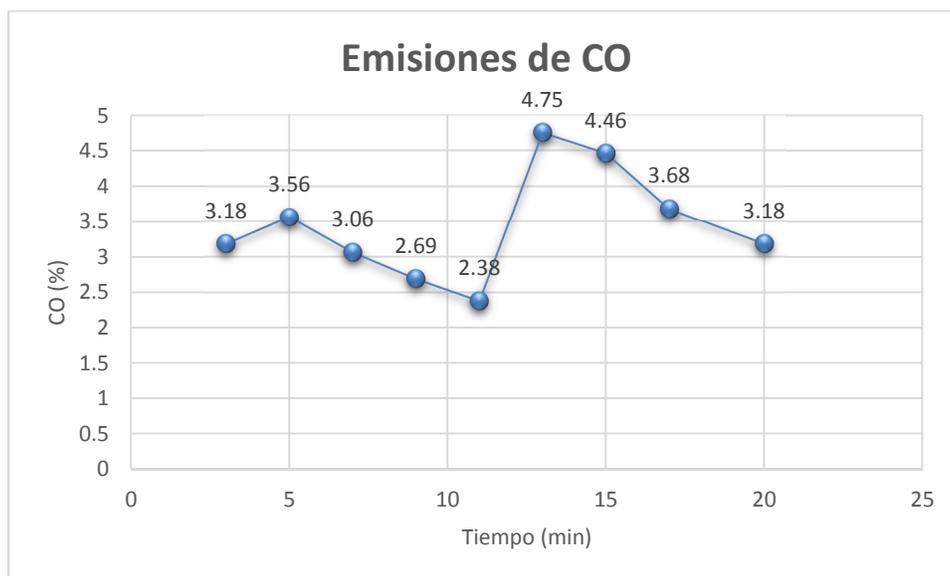


Ilustración 18. Emisiones de CO. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 19 están graficadas las emisiones de CO₂, las cuales son un producto inherente de la combustión, sin embargo en ciertas ocasiones puede reducirse (en volumen) al aumentarse la eficiencia del motor. El aumento de las emisiones de CO₂ en porcentaje se debe a la variación de la relación másica entre el combustible y el oxidante (aire). En este caso, se notan emisiones iniciales demasiado altas en comparación a las emisiones luego de que se estabiliza el funcionamiento del motor, esto se debe al arranque en frío del vehículo. Luego, las emisiones se tratan de estabilizar que como se mencionó anteriormente están por debajo de los niveles exigidos en la norma, las curvas ascendentes y descendentes se deben al régimen acelerado en las pruebas del motor.

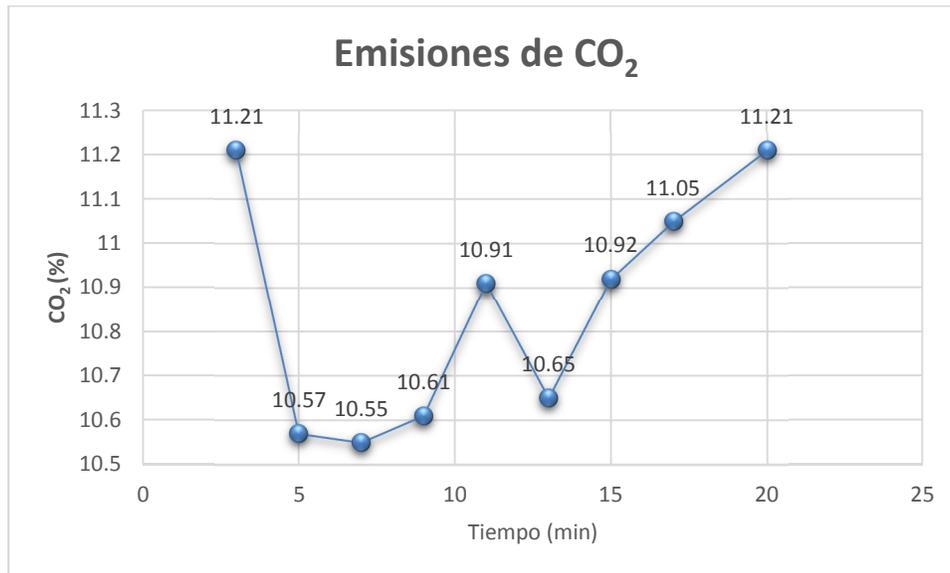


Ilustración 19. Emisiones de CO₂. Fuente: Elaboración propia

Así comparado con las emisiones antes de hacer las modificaciones y la adición de hidrógeno se encuentra que las emisiones de HC se redujeron en un 20.54% debido a que el hidrógeno no tiene contenido de carbono y debido a que las altas temperaturas y la energía liberada por el hidrógeno evita los inquemados, así mismo las de CO se redujeron en un 23.13%, las emisiones de CO₂ se redujeron en un 21.875% y finalmente se logran reducir las emisiones de O₂ en un 24.16%.

4.3 Reducción del consumo de combustible con la adición de hidrógeno

En la ilustración 20 se muestra el consumo de combustible sin hacer ninguna modificación, apuntando a los datos entregados por el fabricante, teniendo en cuenta que el recorrido se hizo durante 4 horas y con paradas por semáforos, variaciones de velocidad y circulación por subidas y bajadas.

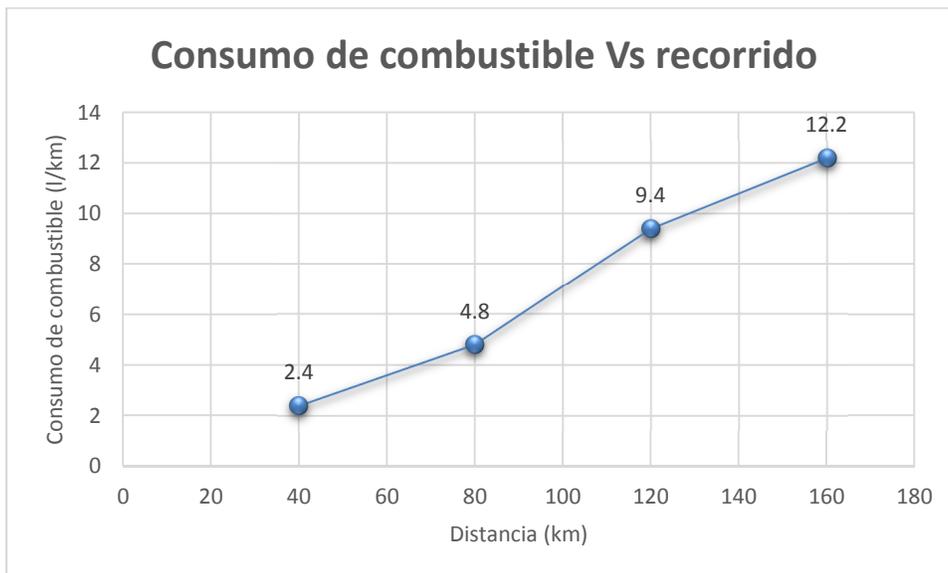


Ilustración 20. Consumo de combustible Vs recorrido sin la adición de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

El consumo de combustible de este carro desde fábrica es de 7.1 litros por cada 100 kilómetros; cuando se hizo la prueba de las 4 horas en funcionamiento del motor se encontró que en promedio este consumo se redujo hasta en un 50%, es decir, según cuentas se obtuvo un consumo de 3.7 litros por cada 100 kilómetros al hacer las modificaciones mencionadas anteriormente para la adición de hidrógeno. En la ilustración 21, se muestra una gráfica aproximada del consumo de combustible durante el recorrido que fue al menos de 160 km durante las 4 horas de prueba, teniendo en cuenta paradas y reducciones de velocidad. Sin embargo, no se tiene un dato de consumo real tanto del hidrógeno como de la gasolina, ya que para las pruebas experimentales no se contó con equipos de medición de flujo. Por esta razón debemos confiar en los datos entregados por la aguja del medidor del tanque, el tiempo de funcionamiento del carro y los cambios de velocidades hechos durante el camino.

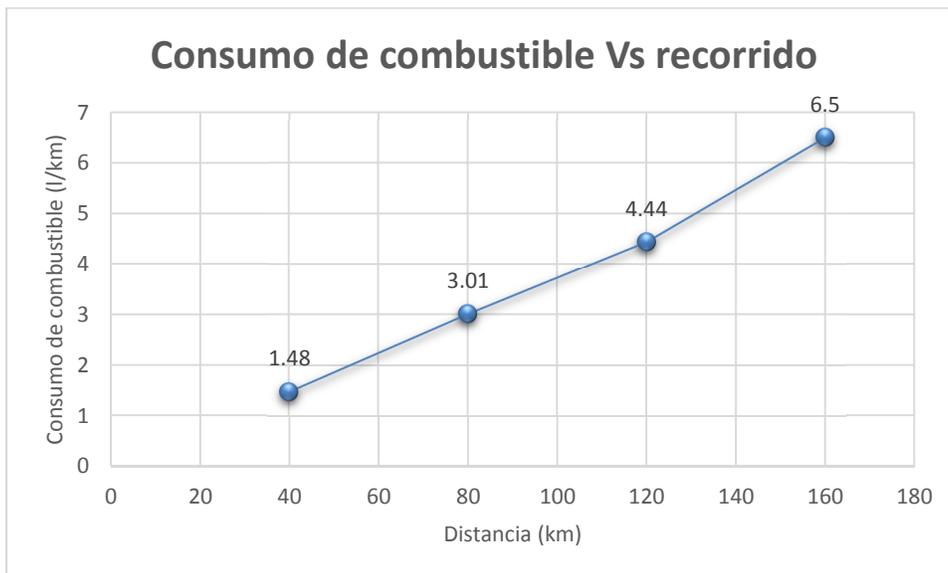


Ilustración 21. Consumo de combustible Vs recorrido con la adición de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

Se estima que adicional a las modificaciones hechas, el ahorro en gasolina y el motor no apagarse al reducirse el orificio de los “boquereles”, es decir, el motor de fábrica tiene una abertura en los “boquereles” de admisión de 20 centésimas y al reducirse a 10 centésimas lo más probable es que se apague el motor, debido a una disminución energética dentro de los cilindros, esto se debe a la adición energética del hidrógeno, que suple la reducción de gasolina y además tiene un poder calorífico mucho mayor que la gasolina corriente, por lo que logra convertirse en una fuente combustible óptima para el funcionamiento del motor, debido a que la energía liberada en el momento de la ignición es la suficiente para que el motor funcione en modo dual o incluso con una sustitución del 100% de la gasolina por hidrógeno.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- En este trabajo se logró desarrollar un modelo experimental con celdas de combustible, que logró suplir la necesidad energética de un motor de combustión interna de un carro en ciclo Otto en modo dual hidrógeno-gasolina. Notando mejoras ambientales y en el consumo de combustible.
- Se evaluaron las modificaciones y adaptaciones de tecnologías que se le hicieron al carro, notando que el funcionamiento no se vio afectado en ninguna de las etapas de la evaluación experimental.
- El rendimiento ambiental mejoró de manera notable a excepción del CO₂, debido a las bajas prestaciones actuales del motor, sin embargo se nota que con la adición de hidrógeno se pueden obtener muchos beneficios ambientales en cuanto a otras emisiones en el mismo carro. No obstante, luego de realizar las modificaciones en el vehículo, las emisiones de CO disminuyeron en un 23.13%, las de HC se redujeron en un 20.54%, las de CO₂ decrecieron en un 21.875% y finalmente se logra reducir las de O₂ en un 24.16%.
- El consumo de combustible fue reducido en un 47.88% y se encontró que el funcionamiento del motor no cayó con la adición de hidrógeno.
- Finalmente se recomienda para posteriores trabajos, conseguir medidores para lograr establecer el consumo de combustible, determinar el rendimiento en modo porcentual, determinar los porcentajes de sustitución de gasolina y evaluar otras condiciones de combustión. Por otro lado también es necesario evaluar las posibilidades de generar más hidrógeno con la implementación de un tanque para su almacenamiento.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

REFERENCIAS

- Barilá, D., Llansa, M., Bossolasco, M., Hughes, W., Soria, G., Kolodka, P., & Münnemann, A. (2013). ADAPTACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA USAR HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE . *Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*.
- Bixler, C. (2012). *Efectos ambientales del hidrógeno*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2013, de eHOW, en español: http://www.ehowenespanol.com/efectos-ambientales-del-hidrogeno-lista_48054/
- Colorado García, E. U. (2013). *Hidrogeno Como Combustible ecológico para transbordadores y aviones a partir del luz solar* . Mexico: XXIV Congreso de Investigación CUAM-ACMOR.
- Dieter Weigl, J., & Saidi, H. (2013). Design, Testing and Optimisation of a Hydrogen Fuel cell Motorcycle for South East Asia. *Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pág. 4). Surakarta, Indonesia: Inayati.
- Garzón Tovar, L. (2013). *Tanques moleculares, para el almacenamiento de hidrógeno: el combustible del futuro*. Colombia: Universidad de los Andes.
- Gómez Romero, P. (2002). Pilas de combustibles. Energía sin humos. *Mundo Científico*. No. 233, 66.
- Herath, I., Madeley, D., & Bradshaw, B. (2013). Hydrogen Fuel Cell Taxi: Safety Analysis Experiences. *Technical Centre, Stratford Road, England*.
- Ho, T., Karri, V., Lim, D., & Barret, D. (2008). An investigation of engine performance parameters and artificial intelligent emission prediction of hydrogen powered car. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3837-3846.
- Ji, C., & Wang, S. (2009). Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine at idle and lean conditions. *International Journal of hydrogen energy*, 346-355.
- Ji, C., Liu, X., Gao, B., Wang, S., & Yang, J. (2013). Numerical investigation on the combustion process in a spark-ignited engine fueled with hydrogenegasoline blends. *Intenertional Journal of Hydrogen Energy*, 11149-11155.
- Ji, C., Wang, S., & Zhang, B. (2010). Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogene gasoline engine under various loads and lean conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5714-5722.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

- Ji, C., Wang, S., & Zhang, B. (2011). Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions. *Applied Energy*, 584-586.
- Ji, C., Wang, S., & Zhang, B. (2011). Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions. *Applied Energy*, 584-589.
- Just, J. S. (1943). NOTES ON AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE PRODUCTION UNDER PRESSURE OF ELECTROLYTIC HYDROGEN FOR USE AS A SUBSTITUTE FUEL. *THE INSTITUTION and the BRISBANE DIVISION of the INSTITUTION OF ENGINEERS*.
- Mejía Arango, J. G., & Acevedo Alvarez, C. A. (2013). Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá. *Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Ministro de ambiente, V. y. (2008). RESOLUCIÓN 0910 DE 2008.
- Moldrik, P., & Hradilek, Z. (2009). Hydrogen Production for Solar Energy Storage. *Technical University of Ostrava*.
- NewCarShow.com*. (2011). Recuperado el 04 de Noviembre de 2013, de Mercedes-Benz F125 Concept: http://www.netcarshow.com/mercedes-benz/2011-f125_concept/
- Thanapalan, K., Zhang, F., Maddy, J., Premier, G., & Guwy, A. (2011). Design and Implementation of On-board Hydrogen Production and Storage System for Hydrogen Fuel Cell Vehicles. *The 2nd international conference on intelligent control and information processing*, (pág. 5).
- Utrilla, D. (20 de Octubre de 2008). *Cocheseco.com*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2013, de ¿Como funciona el motor de hidrógeno: <http://cocheseco.com/como-funciona-el-motor-de-hidrogeno/>
- Vegas Serrano, A. (2009). *El hidrógeno y las pilas de combustible*. España: Revista del colegio oficial de físicos.
- Verhelst, S. (2013). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1071-1085.
- Wang, S., Ji, C., Zhang, B., & Liu, X. (2014). Realizing the part load control of a hydrogen blended gasoline engine at the wide open throttle condition. *International Journal Of Hydrogen Energy* , 7428-7436.
- Wang, S., Ji, C., Zhang, B., & Liu, X. (2014). Realizing the part load control of a hydrogen blended gasoline engine at the wide open throttle Condition. *international journal of hydrogen energy*, 7428-7436.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADOS	Código	
		Versión	
		Fecha	

Weigl, J., Inayati, I., Zind, E., & Said, H. (2008). Pios fuel cell Motorcycle; Design, development and test of hydrogen fuel cell powered vehicle. *Universiti Teknologi Malaysia*.

Yu, L., Cai, S., Liping, F., Chengtao, X., & Ran, Q. (s.f.). Plunger and Core Parameter Modeling Research of Cylinder Valve in Hydrogen Fuel Cell Vehicles. *School of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology*.

ZAMUDIO ACOSTA, A. E. (2010). *GENERACION DE COMBUSTIBLE A PARTIR DEL HIDROGENO*.

Recuperado el 04 de Noviembre de 2013, de electromagnetismo2010a:

<http://electromagnetismo2010a.wikispaces.com/file/view/GENERACION%20DE%20COMBUSTIBLE%20A%20PARTIR%20DEL%20HIDROGENO.pdf/144302811/GENERACION%20DE%20COMBUSTIBLE%20A%20PARTIR%20DEL%20HIDROGENO.pdf>