

## Revista Científica y Tecnológica UPSE

### Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a 2800 m.s.n.m.



### An examination of polluting emissions using hydrogen and fuel in an internal combustion engine at more than 2,800 a.m.s.l.

Guillermo G. Reyes<sup>1\*</sup>, Juan F. Iñiguez<sup>1</sup>, William E. Pupiales<sup>1</sup>, Cristian A. Soria<sup>1</sup>, José E. Yépez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Internacional Del Ecuador, Quito, Ecuador

#### RESUMEN

En la actualidad la industria automotriz busca nuevas tecnologías para mejorar los vehículos con respecto a sus emisiones contaminantes, aquello con el propósito de mejorar la calidad del aire y evitar la producción de gases perjudiciales para el medio ambiente a nivel mundial. Las prestaciones de un generador de hidrógeno automotriz fueron analizadas de forma comparativa, mediante el sistema estándar de inyección de combustible tipo gasolina y el mismo sistema estándar de inyección con 139ml de H<sub>2</sub> por minuto a través del múltiple de admisión, con 1 atm de presión. Se realizaron pruebas de emisiones contaminantes bajo la norma Técnica Ecuatoriana INEN 2-203 y 2-204. Los valores que arrojaron las pruebas realizadas de las emisiones de gases contaminantes, el monóxido de carbono presenta una disminución del 23% de su contaminación normal a 2500 rpm a 2800m.s.n.m.

#### Palabras clave:

Hidrógeno  
INEN 2-203  
INEN 2-204  
Altitud  
Emisiones Contaminantes

#### ABSTRACT

The automotive industry is currently looking for new technologies to improve vehicles with respect to their pollutant emissions, with the aim of improving air quality and avoiding the production of harmful gases for the environment worldwide. The performance of an automotive hydrogen generator was analyzed in a comparative way using the standard gasoline fuel injection system and the same standard injection system with 139 ml H<sub>2</sub> per minute through the intake manifold at 1 atm pressure. In this research the dynamometer was tested by means of DIN 70020 for torque - power and the pollutant emissions were tested under the local Technical Norm INEN 2-203 and 2-204. The values of the tests performed on the dynamometer with the presence of hydrogen indicated a power increase of 9.38% over the values of its nominal power. For emissions of pollutant gases, carbon monoxide shows a 23% decrease of its normal pollution at 2500 rpm.

#### Keywords:

Hydrogen  
INEN 2-203  
INEN 2-204  
Altitude  
Polluting emissions

**Recibido:** 10 de agosto de 2017 **Aceptado:** 10 de abril de 2018

**Forma de citar:** Reyes, G., Iñiguez, J., Pupiales, W., Soria, C. y Yépez, J. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a 2800 m.s.n.m. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 5 (1), 19-28. DOI: 10.26423/rctu.v5i1.287

\* Autor para correspondencia. [gureyesca@uide.edu.ec](mailto:gureyesca@uide.edu.ec)

### 1. Introducción

El crecimiento exponencial del parque automotor a nivel mundial representa un aumento significativo en la cantidad de los gases tóxicos hacia el medio ambiente. Es por ello que se necesita buscar soluciones que reduzcan el nivel de toxicidad de los residuos contaminantes generados por los vehículos motorizados. [1]

La opción más económica, tanto en el ámbito manufacturero como en el ambiental es la aplicación de hidrógeno en motores de combustión interna, sin embargo esto requiere una modificación a la estructura del motor y más tecnología para su adecuado funcionamiento. Por otra parte, los vehículos que usan un generador que emite pequeñas cantidades de hidrogeno al motor, son apenas reacondicionados para funcionar con el mismo. Los vehículos que funcionan con una parte de hidrógeno y combustible, o totalmente con hidrógeno, son una tecnología relativamente nueva. Por otro lado, existen otros tipos de automóviles que son propulsados por dos tipos de sistemas: el motor de combustión interna similar a la versión con motor de gasolina, y la conversión de células de combustible que permite reaccionar el hidrógeno con el oxígeno para producir electricidad a la alimentación de un motor eléctrico. [2]

El motor de combustión interna de hidrógeno fue inventado en 1807 por François Isaac de Rivaz, aunque no fue hasta 1970 que se publicó una patente en Estados Unidos. En la Figura 1 se observa la evolución del mismo desde sus inicios hasta la generación del primer manifiesto. [3]

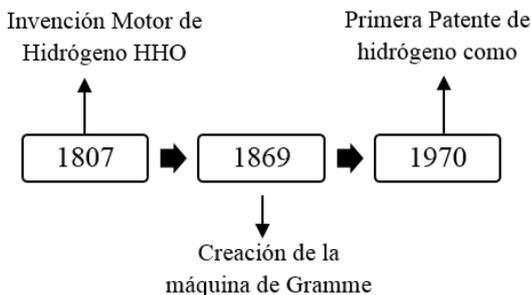


Figura 1. Línea del tiempo del uso del Hidrógeno. Fuente. [3]

Para el año de 1869, Zénobe Gramme inventó la máquina de Gramme y la electrólisis del agua se convirtió en un método más barato para la producción de hidrógeno. [3]

Las marcas que invirtieron principalmente en este tipo de autos son: Audi y BMW, dichas marcas hicieron el estudio, aunque aún no se comercializa, invirtieron en el desarrollo de diseño del motor e infraestructura para cargar combustible. [4]

En la actualidad existen algunos inconvenientes, entre ellos está el almacenamiento del hidrógeno ya que para

mantenerlo en forma líquida es necesario presurizarlo y enfriarlo a una temperatura de 20,28°K (-252,87 °C/-423,17 °F), y cuando se combustiona en el motor se genera una temperatura de 2000°C instantáneamente posterior a ella. [5]

### 2. Fundamentación teórica

El hidrógeno fue pensado como combustible por primera vez en libros; pero en 1970 el electroquímico John Bockris anunció que el hidrógeno sería el combustible más usado en el futuro, orientando la economía hacia la producción del mismo. [6]

El hidrógeno es el análogo químico a la electricidad y además es el único combustible verdaderamente limpio. Como la electricidad, el hidrógeno no se encuentra en estado libre en la naturaleza; para ser generado debe existir consumo de otros combustibles. [7]

En la actualidad hay varios métodos que permiten combatir el exceso de gases contaminantes en la atmósfera, ejemplo de estos son el uso de biocombustibles, la sustitución de la gasolina por hidrógeno, entre otros. Dado que el producto de la combustión del hidrógeno es vapor de agua, las emisiones de gases contaminantes se reducen considerablemente. [8]

#### 2.1. Poder calorífico

El hidrógeno tiene un poder calorífico superior a la gasolina, por lo tanto es un combustible más eficiente en relación al volumen de gasolina que se debe utilizar para realizar el mismo trabajo dentro de la cámara de combustión.

En la Tabla 1, se observa los valores del poder calorífico de diversos combustibles convencionales:

Tabla 1. Poder Calorífico de Combustibles.

Combustible	KJ/g	Kcal/g	BTU/lb
Hidrógeno	141,9	33,9	61
Gasolina	47	11,3	20
Diésel	45	10,7	19,3
Etanol	29,7	7,1	12
Propano	49,9	11,9	21
Butano	49,2	11,8	21,2
Madera	15	3,6	6
Carbón Lignito	15	4,4	8
Carbón	27	7,8	14
Gas Natural	54	13	23

Fuente. [9]

Al combinarse dos tipos diferentes de combustibles se obtiene una mezcla entre ellos, como el hidrógeno es más eficiente que la gasolina convencional, se obtendrá un aumento de potencia proporcional al aporte que éste entregue al motor, especialmente en la aceleración donde se gasta más energía al romper el reposo inercial. [9]

La vía seleccionada de producción de  $H_2$  viene establecida por la economía del proceso, por las necesidades del mercado y también por las regulaciones ambientales. El hidrógeno permite el reemplazo a un amplio grupo de precursores primarios tales como combustibles fósiles y energía nuclear.

Con una penetración cada vez mayor, las energías renovables como la eólica, solar, biomasa, entre otras; van tomando espacio en el mercado de combustibles para vehículos motorizados. [10]

### 2.2. El hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más simple de todos al estar compuesto por un único protón en su núcleo, acompañado de un electrón. Esta simpleza es la causa de que fuera el primer elemento en formarse después del Big Bang junto con el helio, pues empezó a condensarse en grandes nubes de gas que darían lugar a las primeras estrellas y, más tarde, galaxias. [11]

La Figura 2 presenta una proyección de las reservas de hidrocarburos fósiles que existen en el planeta. De acuerdo con el Ministerio de Educación de Argentina las reservas de combustibles solo duraran de 10 a 50 años, es decir para el 2050 el petróleo será cosa del pasado, pero su caída ocurrirá antes dado que con su creciente escasez, los precios subirían ostensiblemente obligando a distintos países a buscar nuevas fuentes de energía para mover sus ciudades, y el primero en la lista de combustibles es el hidrógeno. [12]

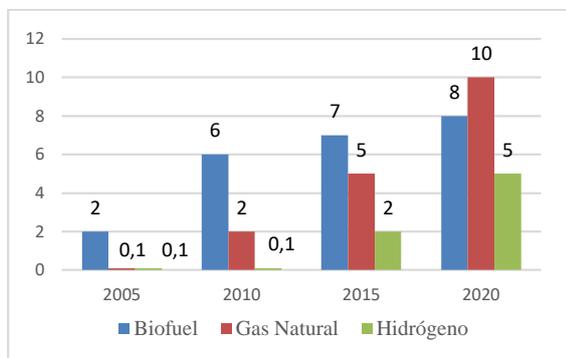


Figura 2. Proyección de la utilización de combustibles. Fuente. [12]

El hidrógeno es tan abundante que se estima que representa el 90% de los átomos que contiene el universo, pero hay que decir que también es el elemento más ligero, así que aunque sea tan abundante sólo representa el 75% de toda la materia ordinaria en términos de masa. Entre otras de sus propiedades, el hidrógeno forma agua al oxidarse; cuando el este gas se quema, dos átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de oxígeno de la atmósfera y forman agua esencial para la vida. [13]

### 2.3. Electrólisis

Hay multitud de procesos para convertir distintos elementos en hidrógeno, en uno o varios pasos.

Mediante el proceso de electrólisis el agua se divide en hidrógeno [ $H_2$ ] y oxígeno [ $O_2$ ] con rendimientos elevados y su valor dependerá directamente del coste de la electricidad empleada. Como dato histórico, éste es el método que escribió Julio Verne en su novela: La isla misteriosa de 1874. [14] La electrólisis es un proceso químico a través de la cual una sustancia inmersa en una disolución se descompone por acción de la corriente eléctrica continua, en este caso; la estructura química del agua se separa por medio de la electricidad generada en ella, enviando el hidrógeno hacia el cátodo y el oxígeno hacia el ánodo. [15]

Una importante ventaja es la posibilidad de seleccionar en cada lugar la tecnología que se adapte a sus recursos, como el sistema de generación de hidrógeno que ahorra costos de transporte tomando en cuenta el tiempo de instalación del kit y su fácil aplicación. Es importante resaltar que para tener un mayor flujo de electrones a través del agua se disuelve hidróxido de sodio [ $NaOH$ ] o hidróxido de potasio [ $KOH$ ] como segunda opción, para un mayor amperaje. [16]

En la situación actual una de las técnicas más baratas de obtención de hidrógeno es procesar combustibles fósiles, en particular gas natural que es básicamente metano  $CH_4$ . Aquello es posible debido a que existen pilas de combustible que necesitan hidrógeno. [17]

### 2.4. Aplicaciones

Un estudio realizado por el Instituto de Catálisis y Petroquímica de Madrid en España indica que un autobús de gas natural “tradicional” quema el gas en un motor, y tiene un rendimiento global aproximadamente del 25%; si se convierte el gas natural en hidrógeno y con él se alimenta una pila de combustible, se genera electricidad para mover el autobús con un motor eléctrico, obteniendo un rendimiento estimado cercano al 50%. Con lo que para andar los mismos kilómetros “vía hidrógeno” se gasta la mitad de gas natural. [18]. En la Figura 3, se observa una comparación del hidrógeno con otros combustibles, se toma en cuenta el valor energético basado en el poder calorífico.

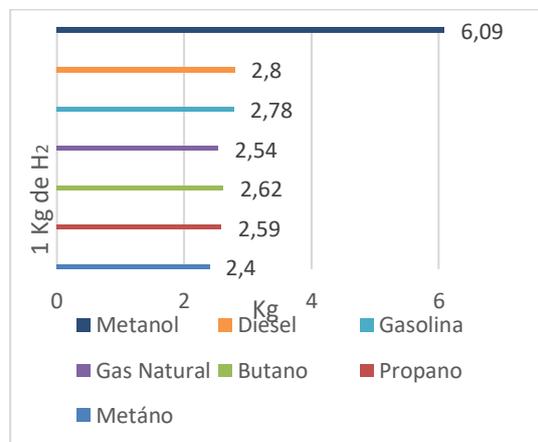


Figura 3. Valor Energético basado en poder calorífico inferior. Fuente. [9]

Según la Figura 3, el hidrógeno es un elemento con mayor eficiencia energética en comparación a otros combustibles, aquello supone una ventaja en el costo y en la cantidad a utilizar en el motor. [19]

### 2.5. Volumen y presiones

Los gases en el planeta tierra son elementos imprescindibles para la existencia de la vida, aquello que se lo denomina como aire; es prácticamente una capa atmosférica compuesta de un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, 0,033% de CO<sub>2</sub>, 0,93% de gases nobles y apenas un 0,037 % de gases entre hidrógeno y metano.

**Tabla 2.** Presiones en principales ciudades.

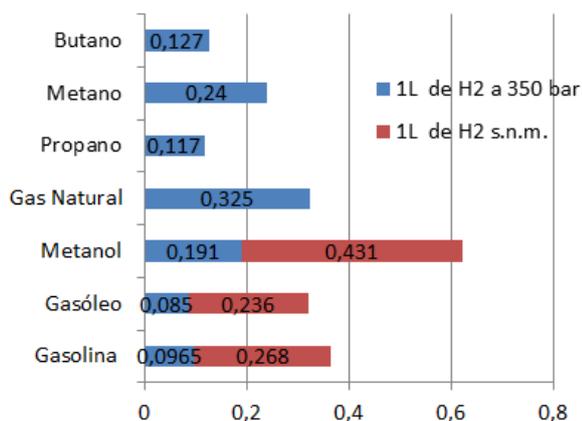
Lugar	Presión Atmosférica [bar]
Quito	0,7177
Guayaquil	1,011
Nivel del mar	1,013

Fuente. [20]

En la Tabla 2, se observa las distintas presiones atmosféricas en dos Ciudades del País.

Cuando se habla de los gases se toma en cuenta las dimensiones que ocupan en el espacio, como el volumen, la presión, y temperatura; aquellos factores influyen en el comportamiento de los mismos generando una amplia variedad de condiciones y leyes. Una de las principales es la ley ideal de los gases, la cual establece que: “La presión ejercida por una fuerza física es inversamente proporcional al volumen de una masa gaseosa, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante”. [21]

Al comprender esta ley se asimila las equivalencias del hidrógeno con respecto a otros combustibles. En la Figura 4, se observan datos en forma de barras con la principal propiedad que caracteriza al hidrógeno, la cual es la estabilidad del volumen a grandes presiones, es decir; una comparación de volumen entre diversos combustibles a presión atmosférica sobre el nivel del mar y una presión de 350 bares.



**Figura 4.** Valor Energético basado en poder calorífico inferior bajo presión. Fuente. [9]

Adicional en la Figura 4, un mayor volumen de hidrógeno es requerido para realizar un trabajo, por otro lado al someterlo a presiones elevadas el volumen se mantiene en comparación con la reducción de otros combustibles, aproximadamente al triple de su volumen inicial. [22]

Producir electricidad quemando combustibles es poco eficiente y demasiado contaminante debido a la carbonización de materiales y la expansión de los gases de combustión. Al mover una máquina; cuando se habla de motores y turbinas, se tiene un rendimiento máximo llamado “Límite de Carnot” en el entorno del 75%. En la práctica una máquina en condiciones muy buenas dará un 45%, y si se requiere que se trabaje con alta potencia y régimen variable como el motor de un vehículo, se rondará un exiguo 25%. [23]

Estos bajos rendimientos tienen como resultado quemar más combustible para conseguir la misma energía final, dando consecuentemente una contaminación mayor. Y como “quemar” supone alcanzar altas temperaturas, aumenta la producción de contaminantes como los óxidos de nitrógeno. [24]

### 3. Materiales y métodos

En este estudio se realizó un análisis de gases contaminantes de un motor de combustión interna a gasolina y el mismo motor con aplicación de hidrógeno directo a la admisión, con el objetivo de comprobar la reducción de vapores tóxicos al medio ambiente y la eficiencia energética que brinda este combustible a través de la utilización del método *BIFUEL*.

En la fase experimental se usó una solución de 200gr de hidróxido de potasio en 1500cc de agua destilada. Una vez realizada la solución, se introdujo en el reservorio la mezcla completa para posteriormente ingresar al generador. A través del proceso de electrólisis y por medio del burbujeador se obtuvo un caudal constante de hidrógeno de 139ml por minuto de ingreso hacia el múltiple de admisión [4,2cm después del filtro de aire].

**Tabla 3.** Parámetros de ensayo.

Compuesto	Agua destilada	Caudal H <sub>2</sub>
200 gr. [KOH]	1,5 L [H <sub>2</sub> O]	139 ml

Fuente. [Autores]

Con los parámetros descritos en la Tabla 3, se realizaron las pruebas antes mencionadas. A diferencia de otros generadores automotrices de hidrógeno disponibles en el mercado ecuatoriano se utilizó solo hidrógeno, despreciando el oxígeno que el generador produce, esta decisión se la tomó por la necesidad de conocer el comportamiento de los gases con la aplicación de un solo gas extraño en el motor. Aquella determinación proyecta resultados distintos en las pruebas de otras investigaciones que no desprecian el oxígeno.

### 3.1. Vehículo

El vehículo para las pruebas fue un automóvil de categoría M1 código SUV, modelo GRAND VITARA marca CHEVROLET, año 2004, motor 1597cc, con un recorrido de 205 000Km. Se escogió este modelo por su mayor comercialización a nivel nacional. Como una ventaja, desde el año 1999 hasta el 2015 sus mecanismos y estructura fue ligeramente alterada, aquello permite una mayor facilidad en el control del vehículo y en la obtención de diversos componentes que se requieren para el estudio y la realización de las pruebas. [25]

### 3.2. Combustible

El combustible que se utilizó en el presente estudio es gasolina extra de 87 octanos del país ecuatoriano, se escogió ese carburante a causa de su bajo precio, es decir; está al alcance de cualquier persona y porque es el combustible de mayor consumo a nivel nacional según se explica en la Figura 5.

Se tomó en consideración no mezclar los combustibles de diferentes octanos para evitar variación en los datos. [26]

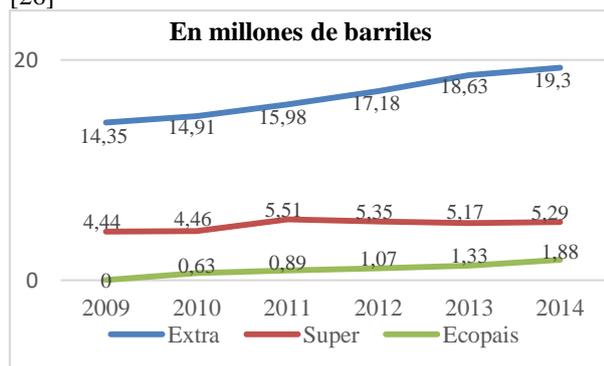


Figura 5. Evolución del Consumo de las Gasolinas. Fuente. [27]

De acuerdo a los datos obtenidos de Petroecuador, existe un aumento significativo en el consumo de carburante de 87 octanos desde el 2009 hasta el 2014 a nivel nacional. El estudio con este combustible se lo realizó para tener una combinación con otro elemento como el hidrógeno con el objetivo de comprobar la eficiencia de esta mezcla en el rendimiento del motor y las consecuencias que vendrían hacia los componentes del mismo a lo largo de toda la fase experimental. En la Figura 6, se observa la ecuación general de la gasolina.

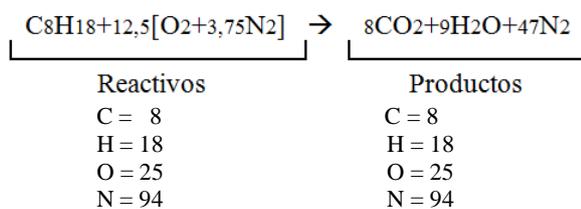


Figura 6. Ecuación General Gasolina. Fuente. [28]

### 3.3. Hidrógeno

Al introducir agua destilada al generador, el mismo permite dividir las moléculas de agua a través de la electrólisis, de tal manera que el oxígeno se dirige hacia el ánodo y el hidrógeno hacia el cátodo. El hidrógeno que produce el generador es un elemento abundante en la tierra. [29]

Se escogió el hidrógeno debido a sus ventajas sobre el combustible tradicional, tanto en el poder calorífico como en su octanaje, de manera agregada es un elemento poco nocivo para la salud en pequeñas cantidades y este de forma ideal no genera contaminación.

La temperatura de auto ignición es mayor en comparación a otros carburantes tal como se explica en la Tabla 4.

Tabla 4. Temperaturas de auto ignición

Combustibles	Temperatura [°C]
Gasolina	250°C
Diésel	269,5°C
Hidrógeno	584,85°C
Metano	537°C
Propano	540°C

Fuente. [30]

El hidrógeno es 0% contaminante, inodoro e incoloro y lo importante, no es tóxico. Es un elemento poco utilizado en la industria automotriz debido a su complejo almacenamiento, sin embargo su eficiencia energética supera a los otros combustibles con relación al peso lo que la convierte en una opción atractiva. [30]

### 3.4. Generador de hidrógeno

El hidrógeno se lo obtiene mediante un proceso de electrólisis en el generador con la mezcla de agua destilada e hidróxido de potasio. En la siguiente Tabla 5 se aprecia las especificaciones del generador.

Tabla 5. Ficha Técnica Generador.

Especificaciones del Generador de Gas HHO	
Número de placas	14
Ánodos	2
Cátodos	2
Número de placas neutras	10
Toma de abastecimiento	2
Cámaras generadoras	6
Estructura	Acero 316L
Relé	1
Electrolito	KOH
Voltaje	12 a 14 v D.C.
Consumo Eléctrico	3 a 8 A
Caudal	139 ml / min
Capacidad de agua	100 – 150 ml
Amarra cable	18" x 4,8 mm

Fuente. [31]

El número de placas positivas y negativas son iguales para tener un mejor equilibrio eléctrico, según las especificaciones del generador construido por la empresa ecuatoriana Hidroxi. [31]

### 3.5. Reservorio y burbujeador

El burbujeador es un compartimento de seguridad el cual se encuentra en la parte interior del reservorio, actúa como separador de las burbujas generadas en el depósito con el agua del mismo; se considera al reservorio y al burbujeador un solo cuerpo. En lo referente a su estructura es un recipiente parcialmente lleno de agua, en este caso el nivel del mismo no será inferior al ¼ de la capacidad total del reservorio, de forma adicional no superará los ¾ debido a la conexión de la manguera de hidrógeno hacia la admisión, de lo contrario el motor absorbería agua y no gas.

En la Tabla 6, se observa las especificaciones del depósito y el burbujeador a utilizar en las pruebas.

Tabla 6. Ficha técnica reservorio y burbujeador.

Reservorio – Burbujeador	
Reservorio Capacidad	1,8 L
Burbujeador H <sub>2</sub> tipo filtro capacidad	0,8 L
Diámetro manguera tipo Nylon	8 mm
Toma del Burbujeador	2
Toma de reservorio al generador	1
Toma de salida de gas a la admisión	1
Tapa de suministro al depósito	1

Fuente. [Autores]

El depósito está diseñado para albergar entre 500 a 800 ml [0,5 a 0,8 litros] de agua destilada con electrolito [KOH] y los 5×10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup> [0,5 litros] donde se aloja el gas HHO para luego ingresar a la admisión del motor de combustión interna.

### 3.6. Diagrama eléctrico

Para esta investigación se generó un circuito eléctrico, como se observa en el Diagrama 1. La utilización de un interruptor que acciona al relé, actúa como mecanismo de accionamiento manual del generador utilizado en esta investigación ya que se requirió activarlo y desactivarlo acorde a las necesidades de las pruebas establecidas.

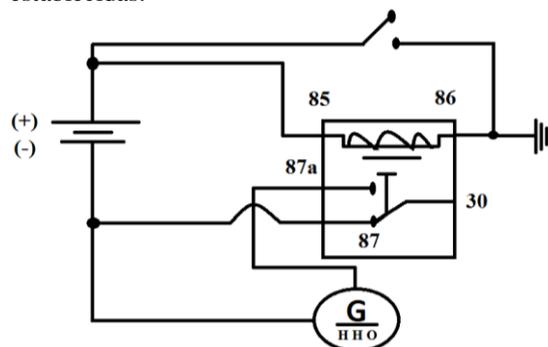


Diagrama 1. Circuito instalación del generador HHO. Fuente. [Autores]

### 3.7. Equipo

El equipo utilizado fue el analizador de gases marca BRAINBEE AGS2866, calibrado bajo norma INEN 2-204, ya que fue indispensable conocer los diversos vapores que se forman en la salida del tubo de escape y comprobar la disminución de los niveles de toxicidad en las emisiones con el fin de contribuir al cuidado del medio ambiente y la reducción de los gases de efecto invernadero. La medición con este equipo se la realizó a 2800 m.s.n.m.

### 3.8. Normativa técnica

La Norma Técnica 2204 del Instituto Ecuatoriano de Normalización, relacionada al control de los gases contaminantes que generan los vehículos, establece los límites máximos de emisiones permitidos para: “Toda fuente móvil con motor de gasolina, durante su funcionamiento en condición de marcha mínima o ralentí y a temperatura normal de operación, no debe emitir al aire monóxido de carbono e hidrocarburos no combustionados hacia el medio ambiente.” [32]

De esta manera se contrastó los resultados obtenidos en el analizador de gases producto de la combustión del hidrógeno, junto con los parámetros descritos en la normativa mencionada.

Para estos ensayos se tomó en consideración varios datos obtenidos de la Corporación para el mejoramiento de la calidad del aire de Quito [Corpaire] con el fin de analizarlos y posteriormente compararlos con los resultados de la fase experimental de esta investigación. Todos los vehículos descritos en la Tabla 7 son motor 1.6 L. de diferentes ciudades del país con intervalo de años del 2000 a 2015.

Tabla 7. Factores de Emisión CO, HC y O<sub>2</sub> al utilizar el ciclo IM240.

Datos	Intervalo de años					
	2000 - 2005		2006 - 2010		2011 - 2015	
Placa	PCO 0367	PBN 3300	PQC 0617	PDB 1924	PCE 1033	PCL 7722
Año Fabric.	2003	2004	2007	2008	2013	2014
Odómetro [km]	185K	220K	230K	143K	133K	61K
Año Revisión	2015	2016	2016	2017	2017	2014
CO 2500 rpm [%]	0.34	0.25	0.09	0.11	0.03	0
HC 2500 rpm [ppm]	98	26	26	48	14	1
O <sub>2</sub> 2500 rpm [%]	0.26	1.42	0.61	0.41	0.28	1.25

Fuente. [33]

En la Figura 7, se observa las emisiones en porcentajes de CO y O<sub>2</sub> de 6 vehículos modelo Grand Vitara marca Chevrolet desde el año 2003 hasta el 2014.

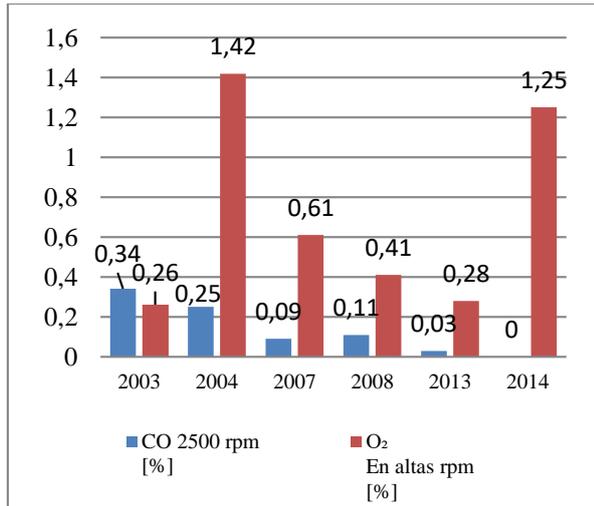


Figura 7. Emisiones en porcentajes. Fuente. [33]

Según la Figura 7, un vehículo nuevo presenta parámetros bajos en vapores de contaminación al medio ambiente, con el aporte de hidrógeno como combustible al motor del vehículo de estudio del año 2004, se llegó a obtener datos similares a los de un vehículo nuevo. De forma adicional, los datos nos indican una disminución del CO hasta el 0% conforme aumenta el año de fabricación del automotor; de igual manera los hidrocarburos disminuyen mientras el vehículo es más nuevo según la Figura 8.

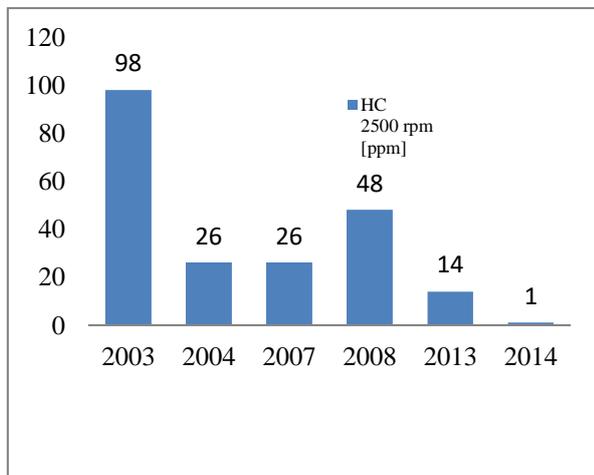


Figura 8. Hidrocarburos al medio ambiente Fuente. [33]

De acuerdo a los datos obtenidos por la *Corpaire*, un coche nuevo de fábrica envía al ambiente 1 ppm de Hidrocarburos en el transcurso del año, con un intervalo de 2 a 14 ppm para el año próximo.

#### 4. Comparativa de resultados

En las pruebas de emisiones de gases contaminantes se tomaron medidas de hidrocarburos no combustionados, monóxido de carbono, dióxido de carbono y el factor lambda en función del tiempo [t] y en función de las revoluciones del motor [rpm].

Se realizó 3 mediciones de 45 segundos cada una, los primeros 30 segundos son medidas a 2500 rpm, posterior a éstos, se deja caer las rpm hasta ralentí y se toman los últimos 15 segundos de tiempo. En las Figuras 9 - 12 se observan datos obtenidos por medio del analizador de gases.

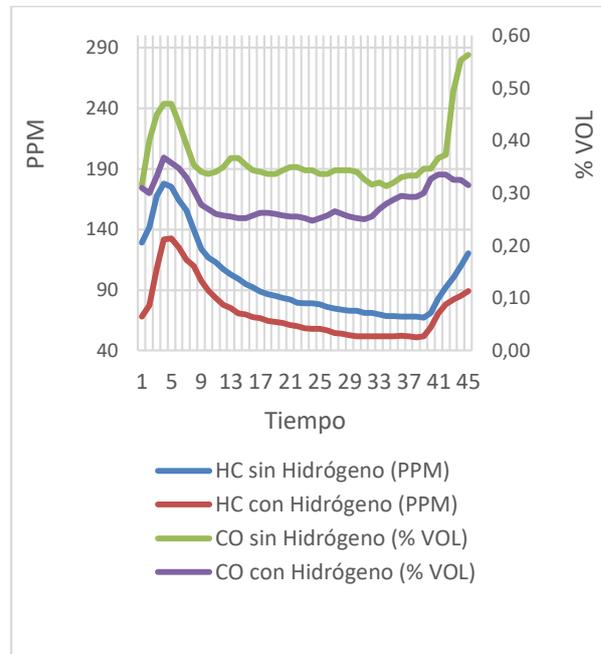


Figura 9. Prueba de Hidrocarburos [HC] Promedio vs Prueba de Monóxido [CO] Promedio. Fuente. [Autores]

Los resultados de las pruebas que se realizaron indican un aumento de hidrocarburos [HC] y de monóxido de carbono [CO] en los 5 primeros segundos, esto sucede por la aceleración desde ralentí hasta las 2500rpm en donde el motor por efecto de la aceleración inyecta más combustible y se genera una mezcla rica [ $\lambda < 1$ ] en la cámara de combustión para lograr un aumento en la fuerza de detonación, lo que significa más trabajo, logrando un aumento de revoluciones. Después de este tiempo inicial dichos parámetros inician una normalización bajando a partir de los 7 segundos, debido a esto no hay necesidad de romper la velocidad inercial, aquello normaliza la inyección de combustible y la relación lambda, lo que reduce las emisiones de hidrocarburos [HC] y monóxido de carbono [CO] paulatinamente.

Después de los 30 segundos a 2500 rpm, se retornó a ralentí nuevamente, aquí la computadora recalcula la mezcla para aumentar el porcentaje de gasolina y mantener la velocidad mínima necesaria para que el motor permanezca encendido. Es por eso que hay un aumento en la emisión de los gases en los últimos 5 segundos; sin embargo el monóxido de carbono [CO] con hidrógeno mantiene valores estables y evita picos de emisiones durante la caída a ralentí.

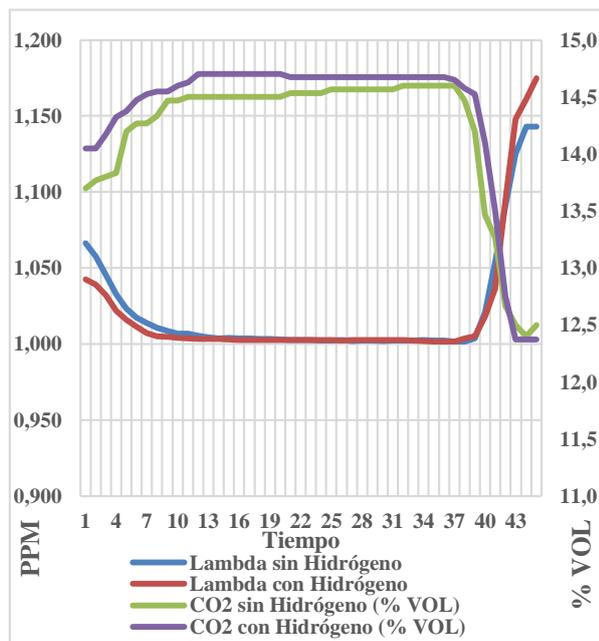


Figura 10. Prueba de Factor Lambda [λ] promedio vs Prueba de Dióxido [CO<sub>2</sub>] Promedio. Fuente. [Autores]

El CO<sub>2</sub> es un producto natural de la combustión, este compuesto junto con el agua es el único resultado de una combustión ideal, aumentando cuando la mezcla aire - combustible se aproxima a proporciones ideales. Por medio del catalizador el oxígeno se redistribuye y pasa a combinarse de mejor manera con el carbono resultando el CO<sub>2</sub>. Lo que se analizó con el aporte de hidrógeno, es una mejor distribución del oxígeno.

Lambda es la relación en proporción aire – combustible donde el aumento de lambda implica más aire, y la reducción del mismo más combustible. En la Figura 10, se contrasta en los primeros 10 segundos la existencia de una variación de mezcla pobre a mezcla rica sin presencia de hidrógeno, [ $\Delta\lambda: \lambda_{pobre} = 1,066 - \lambda_{rica} = 1,007$ ], y con hidrógeno [ $\Delta\lambda: \lambda_{pobre} = 1,043 - \lambda_{rica} = 1,004$ ]; esto significa que para aumentar la fuerza de detonación y aumentar las revoluciones, se requiere mayor carga de combustible.

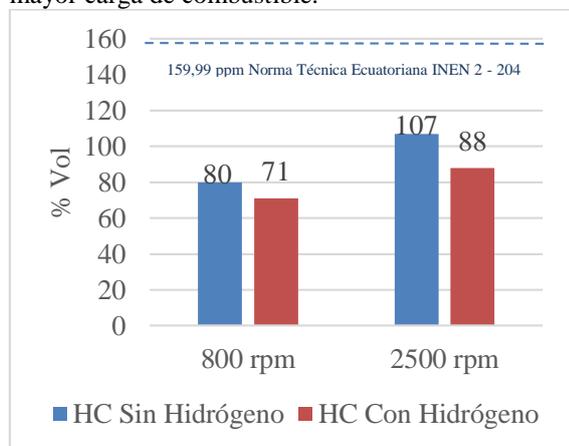


Figura 11. Prueba de Hidrocarburos [HC] Promedio en función de las revoluciones [rpm]. Fuente. [Autores]

Dentro de los resultados que se obtuvo, se observaron a los hidrocarburos no combustionados [HC] y al monóxido de carbono CO, que bajaron significativamente con la aplicación del hidrógeno; dos de los gases más nocivos producidos por la combustión de un motor y los cuales son regulados por la Corporación para el mejoramiento de la calidad de aire de Quito [Corpaire]. Los [HC] en altas revoluciones [2500 rpm] se observa una mejora de aproximadamente un 22% y del CO un 23%, esto debido al ingreso del hidrógeno en estado gaseoso el cual tiene ventajas sobre el combustible tradicional ya que éste requiere ser atomizado antes de ser quemado, lo que produce en el cilindro una mejor combustión de la gasolina. Su amplio rango de inflamabilidad lo hace ideal en casi cualquier proporción aire - combustible.

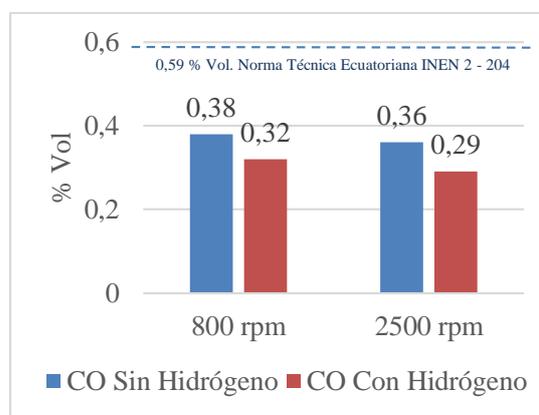


Figura 12. Prueba de Monóxido [CO] Promedio en función de las revoluciones [rpm]. Fuente. [Autores]

El monóxido de carbono se genera cuando hay una combustión incompleta dentro del motor debido a la ausencia de oxígeno. En la Figura 12 se observa que tanto en ralentí como a 2500 rpm el monóxido de carbono disminuye, lo que significa que el calor desprendido del hidrógeno producto de la combustión aprovecha mejor los enlaces de carbono que tiene el combustible.

### 5. Conclusiones

Durante la elaboración de este proyecto, se instaló un sistema que generó un promedio de 139 ml/min de H<sub>2</sub>, el cual se alimentó a través de la toma de aire a 1 atm de presión. Con estos parámetros se realizaron pruebas dinamométricas las cuales arrojaron un aumento de potencia en un 9.38% con respecto al test sin hidrogeno; esto sucede porque el motor considera al hidrógeno como un combustible adicional para su ciclo de expansión, transformándose en una mezcla rica en la cámara de combustión y por lo tanto aumentando sus caballos de vapor.

El motor en su funcionamiento estándar [sin hidrógeno] presentó valores lambda superiores a 1, lo cual indica

una mezcla pobre debido a la menor cantidad de combustible presente, según los datos del analizador de gases en altas rpm; no obstante con la presencia de hidrógeno en el motor, se notó una mezcla de combustible con valores lambda cercanos al ideal. En contraste con los 2 promedios a 2500 rpm la combustión es más eficiente con hidrógeno en un 0,20%, debido a las propiedades que el hidrógeno presenta como elemento químico existente en el medio ambiente.

Las prestaciones generales del vehículo con aporte de hidrógeno aumentan en un 9% con respecto a la condición estándar, esto es la media de todos los datos obtenidos durante las pruebas realizadas, sin embargo este valor no representa una constante, ya que en ciertos momentos el motor es un 9% más eficiente, en otros este porcentaje disminuye incluso a 0%.

El Hidrógeno al ser un combustible en estado gaseoso varía su comportamiento dentro del motor, por lo cual para el uso eficiente de este combustible se requieren modificar variables físicas como los sensores, además la programación de la ECM para controlar de forma óptima los actuadores del motor.

## 6. Referencias

[1] HIRISH, SINGH, JULLENS, WILL; Strategyand; *Auto Industry Trends*; [en línea]; USA; 2016. Artículo Disponible en: <http://www.strategyand.pwc.com/trends/2016-auto-industry-trends>

[2] MANUEL ASTUDILLO; *Motor de Combustión de Hidrógeno*; [en línea]; España; Noviembre; 2014. Disponible en: <http://autastec.com/blog/tecnologias-limpias/motor-de-combustion-de-hidrogeno/>

[3] REVISTA COCHE ESPAÑOL; *Historia de los coches con motor de Hidrógeno*; [en línea]; España; Marzo; 2017. Disponible en: <http://www.automotriz.biz/coches/fuels/alternative-fuels/134081.html>

[4] DAVID VILLAREAL; *Diario Motor; Audi y su producción de combustible sintético*; [en línea]; Marzo; 2016. Disponible en: <http://www.diariomotor.com/2016/03/06/audi-e-gas-allendorf/>

[5] FUNDAMENTOS DEL HIDRÓGENO GASEOSO Plan Nacional de Difusión y Divulgación de la Ciencia y la Tecnología, 2003 del Ministerio de Ciencia y Tecnología. [http://www.energiasostenible.net/fundamentos\\_hidrogeno.htm](http://www.energiasostenible.net/fundamentos_hidrogeno.htm)

[6] COLIN BAIRD; *Química ambiental*; Reverte; España; 2001; Pag: 274

[7] REVISTA AMBIENTUM; Sección Energía; Investigación Honda y BMW; *El hidrógeno como combustible*; [en línea]; Febrero; 2003. Disponible en:

[http://www.ambientum.com/revista/2003\\_01/HDRGN\\_O.htm](http://www.ambientum.com/revista/2003_01/HDRGN_O.htm).

[8] SERGIO ALEMÁN; *El Hidrógeno como Combustible*; Sección Ecología Verde; [en línea]; Julio; 2013. Disponible en: <http://www.ecologiaverde.com/por-que-no-triunfa-el-hidrogeno-como-combustible-de-vehiculos/+&cd=5&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec>

[9] ARIEMA GUTIÉRREZ; Asociación Española de Hidrógeno; *Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible*; [en línea]; Madrid. Disponible en: [http://www.aeh2.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es](http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es)

[10] JOSÉ LUIS G. FIERRO; *El hidrógeno: metodologías de producción*; Instituto de Catálisis y Petroquímica; Revista Lynchnos; [en línea]; Madrid; 2011; pág 3. Disponible en:

[http://www.fgcsic.es/lychnos/es\\_es/articulos/hidrogeno o metodologias de produccion](http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion)

[11] Aguer Hortal, Mario, and Miranda Barreras, Ángel Luis. *El hidrogeno: fundamento de un futuro equilibrado*. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos, 2005. ProQuest ebrary. Web:

<http://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/6-cosas-que-no-sabias-sobre-el-hidrogeno-631460462498>

[12] MINISTERIO DE EDUCACIÓN ARGENTINO; Olimpiadas Nacionales de Contenido Educativo en Internet; *El hidrógeno en Argentina*; [en línea]; Buenos Aires; 2013. Disponible en: [http://oni.escuelas.edu.ar/2005/CORRIENTES/1071/menu/hidrogeno\\_argentino/hidro\\_arg.htm](http://oni.escuelas.edu.ar/2005/CORRIENTES/1071/menu/hidrogeno_argentino/hidro_arg.htm)

[13] MARC FÀBREGA RAMOS; *Hidrógeno: aplicación en motores de combustión interna; Propiedades del hidrógeno*; Barcelona; 2009. pág 50.

[14] ELÍAS CASTELLS, XAVIER, AND JURADO, LORENA. *El hidrógeno y las pilas de combustible*; Ediciones Díaz de Santos; Madrid; 2012. ProQuest ebrary. Págs. 1052 - 1053.

[15] ARES VAN JAAG; *El motor de agua*, Editorial Planeta Alvi; Girona – España; 2013; Págs. 18.

[16] XAVIER ELIAS CATELLS, LORENA JURADO DE GARCÍA, *El hidrógeno y las pilas de combustible*; Ediciones Díaz de Santos, Madrid-España, 2012, Págs. 1052

[17] XAVIER ELIAS CATELLS, LORENA JURADO DE GARCÍA, *El hidrógeno y las pilas de combustible*; Ediciones Díaz de Santos, Madrid-España, 2012, Págs. 1052

[18] PABLO LLORET BASSECOURT; Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño; *Estado de la tecnología en la cadena de valor del gas natural*:

aplicaciones a nuevos productos y servicios; Valencia-España; 2015. Págs. 156 -158

[19] IGNACIO GUERRA, MERCEDES BALLESTEROS, MARÍA DEL ROSARIO HERAS; Ministerio de Educación de España; *Fuentes de energía para el futuro*; España; 2008. Págs. 95

[20] WORLD METEO Plataforma; *EL tiempo en Quito. (2017)*; [en línea]; Parámetros de altitud; Ecuador Región Costa – Sierra. Disponible en: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/ecuador/quito/tiempo-101692/>

[21] MAURIZIO CASELLI; *Contaminación Atmosférica*, Editorial Siglo Veintiuno; México; 2000. Págs. 19.

[22] PEDRO RAMON CASTELLANOS, Energías y medio ambiente, Ediciones universidad de Salamanca, España, 2005, Página 330-331

[23] JOSEPH W KANE, MORTON STERNHEIM, *Física*, Editorial Reverte, Barcelona-España, 1989, Página 249

[24] ROBERT BOSCH GMBH; *Técnica de los Gases de Escape para Motores de Gasolina*; Editorial Robert Bosch; Stuttgart-Alemania; 2003. Págs. 49.

[25] PATIO TUERCA Plataforma; Los 5 autos más vendidos en Ecuador; Ecuador; 2015. Disponible en: <https://ecuador.patiotuerca.com/blog/marcas-modelos/>

[26] REVISTA PLAN V; Subsidios del Combustible; Editorial Plan V; Ecuador; 2013; pág. 2.

[27] DIARIO EL TELÉGRAFO; Ecuador consume 51 mil barriles de Diésel Premium diariamente; Editorial el Telégrafo; Ecuador; 2012. Disponible en:

<http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/ecuador-consume-51-mil-barriles-de-diesel-premium-diariamente>

[28] MANUEL MASSON; *Determinación de la eficiencia de la mezcla de gasolina con etanol anhidro para su utilización en motores de combustión interna*; [tesis de pregrado]; Escuela Politécnica Chimborazo; Ecuador; 2012. Págs. 3-6

[29] GUILLERMO SÁNCHEZ; *Evaluación de electrodos porosos de carbón vítreo reticulado para la producción de gas H<sub>2</sub> mediante electrólisis del agua*; [tesis de pregrado]; Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas; México; 2014. Págs. 5-9.

[30] NASA SAFETY TRAINING CENTER; *Safe Use of Hydrogen and Hydrogen Systems*; USA; 2006. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070018005.pdf>

[31] HIDROXI ECUADOR; *Hoja técnica generador de hidrógeno*; Quito – Ecuador; 2016; Págs. 1

[32] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN; *Gestión ambiental del aire y vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina Norma 2-204*; Primera Edición; Ecuador; 2002. Págs. 1-8.

[33] Agencia Metropolitana de Tránsito; *Historial de revisiones vehiculares*; [en línea]; Ecuador; 2016. Disponible en: <http://www.ecuadorlegalonline.com/consultas/secretaria-movilidad-quito/consultar-historial-de-revision-vehicular>