

Revisión Exploratoria de la Implementación de Hidrógeno en Motores de Combustión Interna

Exploratory Review of the Implementation of Hydrogen on Internal Combustion Engines

Daniel Camilo Ávila Fajardo ^{1}, Vladimir Silva Leal ^{2**}*

^{1,2} Universidad ECCI, Bogotá, Colombia

** danielc.avilaf@ecci.edu.co*

*** vsilval@ecci.edu.co*

RESUMEN

En la actualidad se presenta un gran problema en la salud de la población y la preservación del medio ambiente; este problema se atribuye a la emisión de gases contaminantes producidos por diversas fuentes como lo son los automóviles, máquinas de carga, fábricas, aerosoles, etc. En un motor de combustión interna, es decir, motores que se ven normalmente en los medios de transporte convencionales como automóviles, camiones o buses se produce una gran emisión de gases contaminantes en el entorno ambiental. Por esta razón, se han buscado diferentes combustibles alternativos, que no produzcan gases nocivos para la salud de los seres humanos y que el medio ambiente pueda preservarse a lo largo del tiempo. En este artículo, se busca dar a conocer al lector las grandes posibilidades que existen al implementar hidrógeno mezclado con combustibles tradicionales, creando una mejora significativa en la reducción de gases tóxicos y mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna. La metodología principal del estudio radica en cómo se puede proporcionar la concentración de hidrógeno por medio de sensores de gas, se muestran detalles del proceso de electrolisis para la destilación del combustible final además de una serie de pruebas en la etapa de inyección hacia el motor observando si estas mezclas brindan las mejores prestaciones al consumidor.

Palabras clave: Celdas de hidrógeno, combustible, contaminación, electrolisis, motores de combustión interna

Recibido: 7 de febrero de 2022. Aceptado: 24 de junio de 2022

Received: February 7th, 2022 Accepted: June 24th, 2022

ABSTRACT

There is now a major problem in the health of the population and the preservation of the environment; this problem is attributed to the emission of gaseous pollutants produced by various sources such as cars, cargo machines, factories, aerosols, etc. In an internal combustion engine, that is, engines that are normally seen in conventional means of transport such as cars, trucks or buses, there is a large emission of polluting gases in the ambient environment. For this reason, different alternative fuels have been sought that do not produce gases harmful to human health and that the environment can be preserved over time. In this article, the aim is to make the reader aware of the great possibilities that exist when implementing hydrogen mixed with traditional fuels, creating a significant improvement in the reduction of toxic gases and improving the efficiency of internal combustion engines. The main methodology of the study is how hydrogen concentration can be provided by gas sensors, details of the electrolysis process for the distillation of the final fuel are shown as well as a series of tests in the injection stage to the engine observing if these mixtures provide the best performance to the consumer.

Keywords: Hydrogen cells, fuel, pollution. Electrolysis, internal combustion engines.

1. INTRODUCCIÓN

Un motor de combustión interna cuenta con diversos componentes que son muy conocidos como lo son el bloque, los pistones, cigüeñal, cárter y la culata. La idea general es que se produzca energía mecánica a partir de energía química, es decir, producir un movimiento mecánico, utilizando la energía emitida por la quema de combustible dentro del motor [1]. Esta quema se genera a partir de una chispa o compresión dependiendo del sistema, que a su vez impulsa los pistones y finalmente estos producen el movimiento. En los motores de combustión interna se pueden encontrar dos ciclos distintos los cuales son conocidos los cuales son el ciclo Otto y el ciclo Diésel.

El ciclo Otto corresponde a un motor convencional de cuatro tiempos, este fue inventado por Nikolaus Otto en 1867, el principio como tal es generar una chispa eléctrica para poder que la mezcla de aire y combustible haga ignición. Por otro lado, el ciclo diésel emplea combustible llamado Gasoil o ACPM, este fue creado por Rudolf Diésel a inicios de la década de 1890, su principio se basa en la compresión del combustible para elevar su temperatura y provocar la ignición [2]. Los motores de combustión interna cuentan con parámetros específicos para su funcionamiento los cuales están divididos de la siguiente manera:

- *Punto muerto superior (PMS)*: Hace referencia al punto máximo de altura que logra el pistón antes de empezar a bajar.
- *Punto muerto inferior (PMI)*: Hace referencia al movimiento alternativo del pistón cuando este llega a su máximo nivel inferior antes de subir, seguido está el diámetro o calibre que corresponde al diámetro interior del cilindro.

A continuación, se encuentra la denominada carrera, que es la distancia entre el PMS y el PMI [2]. Existe una relación adimensional que se basa en dividir la carrera sobre el diámetro. Con esta se identifican las características principales del motor tales como la geometría de los pistones y los ángulos de giro, a continuación, se presentan algunas variables que se verán incluidas en el estudio, el cilindraje unitario es el volumen que desplaza el pistón desde el PMI al PMS.

Otra variable es la cilindrada total que corresponde al cilindraje unitario multiplicado por el número de cilindros del motor, posterior a eso está el volumen de la cámara de combustión el cual es el volumen comprendido en la cabeza del pistón entre el PMS y la culata; por último, se tiene la relación volumétrica de compresión que es el cociente entre

la suma de volúmenes y el volumen de la cámara de combustión [2]. Los motores de combustión interna también cuentan con parámetros de desempeño entre los cuales se encuentran:

- El torque, la potencia de freno, la presión media efectiva al freno, presión media efectiva iniciada, potencia iniciada, consumo de combustible, consumo específico de combustible, consumo de aire, relación aire-combustible, potencia de fricción, eficiencia mecánica, eficiencia térmica, eficiencia relativa y eficiencia volumétrica [2].
- El bloque es el cuerpo del motor, donde están conectados los diferentes cilindros, sistemas de refrigeración y lubricación; en este se encuentran los pistones que suben y bajan dentro del mismo; por esta razón el diseño y fabricación de un bloque de motor debe ser muy rigurosa y detallada.

En el motor existe una cámara de mezcla, donde se encuentra el combustible; el carburante se quema y con la explosión se produce el movimiento rectilíneo de los pistones, este movimiento es transmitido al cigüeñal y posterior a eso se transmite a las bielas brindando la fuerza necesaria para que el vehículo pueda moverse, las bielas junto con los pistones conforman un árbol llamado cigüeñal que se conectan por medio de bulones, esta parte del motor es la encargada de la sincronización del movimiento en los pistones [3].

En el motor también se encuentra el cárter, se puede decir que es una especie de bañera que almacena el aceite que será utilizado como suministro para todo el sistema, este componente tiene como función mantener lubricadas las piezas del motor y está diseñado de tal forma que la gravedad se encargue de mantener siempre el aceite en el fondo para evitar posibles fugas.

En la culata se encuentran los árboles de levas que poseen como función secundaria sellar la cámara de combustión sincronizando a los demás componentes del motor para que funcionen de manera correcta sin olvidar otras piezas como los son las válvulas y sistemas de accionamiento.

Un motor de combustión interna regular cuenta con 2 o 4 tiempos, estos tiempos son, admisión, compresión, explosión y escape. En primer lugar, se tiene la admisión, la cual consiste en que el pistón situado en la parte superior de apertura a las válvulas de admisión para que el combustible ingrese a la cámara de combustión, las válvulas se cierran y el pistón sube haciendo que la mezcla de aire - combustible se comprima, una vez las válvulas cerradas y la mezcla dentro de la cámara, se procede a la producción de una

chispa eléctrica (Otto) o compresión (diésel) dependiendo del sistema; esta acción empuja al pistón hacia abajo donde finalmente se abren las válvulas de escape y los gases residuales producidos por la detonación son expulsados. Una vez los gases son expulsados del sistema se observan las siguientes reacciones, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC), óxidos nitrosos (N₂O) y oxígeno (O₂) [4].

En los últimos años el uso de MCI en las grandes capitales de los países latinoamericanos ha aumentado de manera exponencial debido a las facilidades en la adquisición de los vehículos de este tipo y de las prestaciones que le brindan al consumidor, encerrando un entorno como el de la ciudad de Bogotá donde los automóviles están en uso las 24 horas, representan una cantidad exorbitante de gases tóxicos que día a día generan más problemas en el medio ambiente y en la salud de las personas [5].

El aire que se respira está compuesto por un 20% de oxígeno, un 68% de nitrógeno y el 2% restante de gases inertes y vapor de agua [6]. Cuando los gases tóxicos se mezclan con el aire generan contaminación que es perjudicial en las características físicas y químicas del aire, agua y tierra, estas son nocivas para el ser humano además de la afección y desperdicio de los recursos naturales [5].

En la Fig.1. se puede apreciar la producción de gases tóxicos con diferentes combustibles, como lo son el carbón, gasolina, diésel y gas natural.

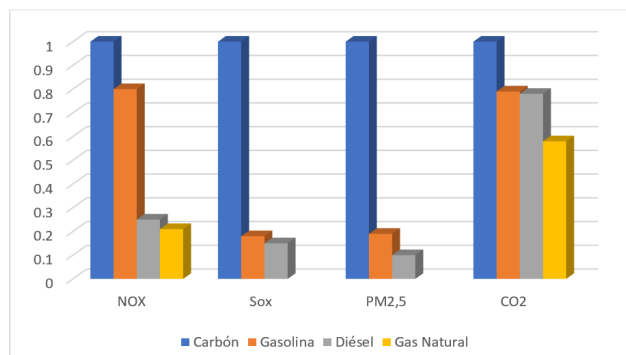


Fig. 1. Producción de gases tóxicos en diferentes tipos de combustibles. [7]

Véase también la Tabla 1. donde se muestra la producción de gases tóxicos por motores de combustión interna
 Inyección sin catalizador: ISC
 Inyección antes del catalizador: IPREVC
 Inyección después del catalizador: IPOSTC

Tabla 1. Producción de gases tóxicos en motores de combustión. [8]

	Carburante	ISC	IPREVC	IPOSTC
CO	Entre 1% y 2%	1+-0.5%	Entre 0.4% y 0.8%	Menor de 0.2%
CO2	Mayor que 11%	Mayor que 12%	Mayor que 13%	Mayor que 13.5%
HC	Menor de 400ppm	Menor que 300ppm	Menor de 250 ppm	Menor de 100ppm
O2	menor de 3.5%	Menor de 2.5%	Menor de 1.5%	Menor de 0.2%
RPM	N/A	N/A	Ralentí	200 RPM

El hidrógeno es un elemento químico incoloro e inflamable el cual abarca una abundante cantidad en la materia universal; el hidrógeno se puede obtener del agua, de la biomasa, gas natural y hasta del carbón [9], es conocido como el combustible del futuro ya que cuando este ejecuta la combustión no genera gases contaminantes [10].

Cuando el hidrógeno se mezcla con oxígeno el cual está en el aire se obtiene una cantidad de energía que equivale a 285 kJ produciendo vapor de agua como producto de la combustión y se puede almacenar de forma gaseosa o líquida [11], ya que después de su combustión no genera gases de efecto de invernadero, el hidrógeno ofrece un beneficio muy bueno ya que reduce las cantidades de dióxido de carbono (CO₂) que se producen durante la quema de combustibles fósiles; como la gasolina, diésel, entre otros [12].

Actualmente el hidrógeno no se encuentra de tal forma que se pueda extraer fácilmente con algún tipo de dispositivo o máquina, por esta razón, hoy en día existen tecnologías como celdas de este elemento o el método de electrólisis que se usan para poder obtener hidrógeno ya sea con agua, aire u otros compuestos [12]. El hidrógeno debe ser procesado antes de utilizarse dado que no es una fuente de energía primaria sino secundaria como por ejemplo los biocombustibles o la energía solar [12].

A continuación, se muestra en la Tabla 2. una comparación del poder calorífico del hidrógeno respecto a otros tipos de combustible.

Tabla 2. Comparación de poder calorífico del hidrógeno respecto a otros combustibles. [13]

Combustible	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
Gasolina	46885	43950
Petróleo bruto	46500	43400
Gas natural	44000	39900
Propano	50450	46350
Butano	49675	45790
Hidrógeno	141853	120011

Los métodos para producir el hidrógeno son principalmente el reformado con vapor, la gasificación del carbón, la electrólisis del agua y gasificación a partir de biomasa a modelo ideal, de forma experimental se tiene un procedimiento llamado descomposición termoquímica del agua [14].

En la Fig.2. se relacionan las fuentes principales de energía para producción de hidrógeno.

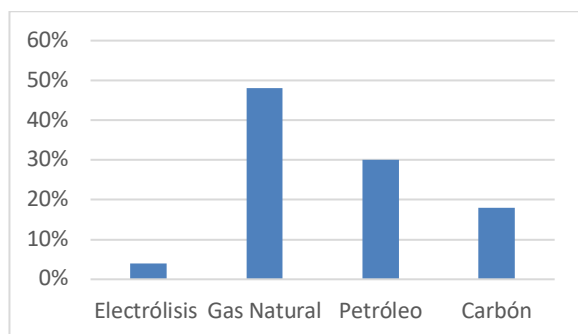


Fig.2. Fuentes principales de energía para obtención y producción de hidrógeno. [14]

Entre los principales países productores de hidrógeno en el mundo se encuentran los Estados Unidos seguido por Corea del Sur, Japón y España [15], en Europa el 6% del hidrógeno utilizado corresponde a aquel comercializado en el mercado en cilindros para uso industrial de diversos tipos y el 94% restante de la producción lo generan las grandes empresas productoras de gas [15].

En América Latina, Chile podría surgir como líder del mercado del hidrógeno limpio ya que el país tiene una excelente producción de electricidad mediante la energía solar y eólica que podría aprovecharse para procesar el hidrógeno y Uruguay también trabaja para desarrollar un mercado local del hidrógeno [16], asimismo este elemento

al ser un gas inflamable presenta peligros mayores tales como riesgo de incendio, toxicidad asfixiante y su inflamabilidad en el aire bajo condiciones normales de temperatura y presión a partir de una concentración de un 4%, es inoloro lo que impide su detección en caso de fuga [16].

Actualmente existen celdas de combustible de hidrógeno las cuales son dispositivos que convierten el hidrogeno en energía eléctrica [17], esta es la razón por la cual la eficiencia energética mejora de dos a tres veces lo que es mayor a la de un motor de combustión interna [18]. Con lo mencionado anteriormente el uso de hidrogeno es preciso ya que este desempeña un papel importante en todos los sistemas energéticos de países en vía de desarrollo a mediano y largo plazo [19].

La implementación de hidrógeno en máquinas de combustión interna ha sido estudiada desde hace mucho tiempo atrás cuando los científicos descubrieron que la utilización del elemento como combustible podría mejorar considerablemente la economía y también reducir las emisiones de gases tóxicos [20].

El estudio de la implementación del hidrógeno como combustible surge en 1874 cuando el científico Jules Verne establece que el hidrógeno obtenido de la electrólisis del agua será el reemplazo del combustible fósil y el carbón [21].

Más adelante más científicos se unieron a la idea de desarrollar estudios con el fin de usar el hidrógeno como combustible, tal es el caso de Rudolf Erren en 1974 cuando desarrolló una investigación enfocada en reducir las emisiones de gases tóxicos teniendo como base un almacenamiento de hidrógeno producido por electrólisis de agua [21].

Ya existen máquinas que funcionan totalmente con hidrógeno en países como Japón o México [22], este hidrógeno es obtenido por el proceso de electrólisis con el cual se alimenta un motor eléctrico, en Japón cuentan con un molino que genera electricidad y posteriormente esta es almacenada en baterías, para que se genere hidrógeno por electrólisis y posterior a eso ser usado en diferentes máquinas [23].

Este uso del hidrógeno se basa en una celda de combustible de membrana polimérica del electrolito (CCMPE) que emplea la energía química del hidrógeno recolectado eficientemente así obteniendo un sub - producto [24]. En otras palabras, un CCMPE es considerado un reactor electroquímico en el que la energía del combustible

(Hidrógeno) es transformada en energía eléctrica. En la Fig.3 se puede apreciar un diagrama del CCMPE a grandes rasgos.

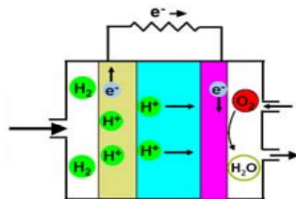


Fig.3. Diagrama del reactor químico CCMPE.

En un motor de combustión interna se logra obtener energía mecánica a partir de energía química o más bien reacciones químicas debido a los procesos [24], dentro de la misma máquina como tal, se genera un proceso químico donde el combustible junto con el oxígeno genera una explosión y de esta manera se mueven los pistones los cuales producen el movimiento del motor [25].

En este caso, el CCMPE busca reemplazar dicho sistema para la generación de movimiento y suministro de poder mucho más limpio y eficiente [26], sin embargo, esta implementación a gran escala, hablando específicamente de los automóviles de Bogotá o Colombia podría tomar años y podría llegar a ser muy costoso [27].

Por esto mismo se plantea una solución mucho más rápida que sin lugar a dudas no es tan efectiva como el uso total de hidrógeno, pero sí sería un beneficio considerable para la reducción de gases tóxicos en el ambiente [28].

Esta solución se basa en un sistema de mezcla del hidrógeno con otro combustible, por ejemplo, gasolina corriente o gas, de esta manera la combustión y rendimiento del motor mejoran considerablemente dando un ahorro en el consumo de combustible y reduce la emisión de gases tóxicos [29].

Como ya se ha mencionado la implementación total de hidrógeno como combustible sería sencillamente ideal para la reducción de los efluentes y mejora de la economía mundial, sin embargo, tomará tiempo para que esto suceda del todo, por diferentes factores como recursos económicos, políticos y sociales [30].

En la actualidad el poder político y el aspecto socioeconómico que dan su prestigio a la extracción de petróleo marcan mucho a la sociedad de hoy en día, esto también representa un obstáculo en el avance de la implementación de hidrógeno como combustible ya que las grandes empresas persisten en su posición de mantener su compañía activa con las cuáles se manejan divisas y equilibrio económico de algunos países [30], esto genera

que la producción de combustible fósil siga siendo la principal en el mundo.

De esta manera se sigue teniendo el control y poder sobre la toma de decisiones en el mercado del combustible, esto sin lugar a dudas es un detractor para el avance del combustible del futuro, sin embargo, desde hace unos cuantos años se propuso una solución más cercana y pronta. Afortunadamente ya se han puesto en marcha diferentes estudios e investigaciones en favor de desarrollar maneras de implementar el hidrógeno en motores de combustión interna con el fin de mezclar el hidrógeno con combustible tradicional para así reducir las emisiones tóxicas y mejorar el rendimiento de los motores en general [31].

2. MATERIALES Y MÉTODO

El presente artículo científico se fundamentaba en una investigación documental ya que se utilizó el método de recolección de información para realizar el apartado de análisis y resultados.

Para esto se recurrió a experimentos y estudios de terceros, publicaciones de papers científicos, medios digitales y páginas web para sustentar la investigación del tema propuesto ‘Implementación de hidrógeno en motores de combustión interna’.

El hidrógeno se mantiene en estado gaseoso a 25°C a presión atmosférica (101.325 kPa). El hidrógeno gaseoso es muy inflamable y arde en concentraciones muy bajas en aire (4% de H₂) [32].

Para lograr calcular la concentración de hidrógeno, específicamente en los experimentos propuestos se emplearon sensores de gas ya que si estos se aplican adecuadamente la medición es más precisa y es la manera más eficaz para la medición de la concentración de hidrógeno. Un sensor que puede ser implementado en dichos experimentos es el ‘Sensor de gases MQ-8’ [33]. Estos sensores muestran sus medidas en ppm (Partes por millón) que es una unidad frecuentemente utilizada en ámbitos físicos y químicos especialmente para verificar la calidad del aire ambiental y calidad del aire en espacios cerrados.

En la tabla 3. se puede observar una comparación del hidrógeno con diferentes combustibles.

Densidad: ρ
 Temperatura de autoignición: Temp.ATI
 Temperatura de la llama: T. LL
 Límite de inflamación de detonación: LID
 Proporción mínima en la ignición: PMIG

Límite de inflamabilidad: LI

Tabla 3. Comparación de hidrógeno con otros combustibles. [34]

Combustible	Densidad (g/cm ³)	LI (%)	Temp. ATI °C	PMIG	T. LL	LID
Hidrogeno	0.038	4.75	536 – 585	0.02 de 1 a 29%	2045 – 2403	13%
Metano	0.656	5.3 – 15	537	0.21 al 8.5%	1914	6.3%
Butano	2.52	1.6 – 8.4	405	0.25 al 4.7%	N/A	N/A
Propano	1.83	2.1 – 9.5	480	0.25 al 5.2%	1925	N/A
Gasolina	4.78	1.0 – 7.6	247	0.29 al 2%	2307	1.10%
Diesel	0.850	0.6 – 7.5	210	N/A	2327	N/A

El motor a gasolina y el de gas natural emplean bujías para producir una chispa eléctrica y con esto producir la quema del combustible mientras que los motores diésel solo requieren del proceso de compresión.

Los motores diésel funcionan de tal manera que cuando el combustible ingresa en la cámara de mezcla del motor este es comprimido, es decir, su presión aumenta, haciendo que la temperatura también aumente y a su vez es provocada la ignición [35], la mezcla en estos motores normalmente es aire caliente y combustible tradicional; lo que se busca es que en esta mezcla se añada hidrógeno a través del filtro de aire, empleando el hidrógeno se logran mejorar las propiedades de la mezcla potenciando la energía y eficiencia del motor.

Para calcular la potencia del motor se debe emplear un dinamómetro con el cuál se miden las fuerzas basadas en la capacidad de deformación, con esto se puede lograr satisfactoriamente la comparación del uso de un motor empleando mezcla de hidrógeno-combustible convencional y combustible tradicional solamente.

En la actualidad un motor de combustión interna cuenta con los combustibles más comunes que son la gasolina, el diésel y el gas natural [34]. Todos estos combustibles cuentan con una temperatura de inflamación distinta y una determinada presión, la escala de temperatura es designada como *temperatura de autoignición* la cual hace que cada motor posea un funcionamiento distinto.

Teniendo en cuenta que el hidrógeno tiene una densidad muy baja y que la cantidad que se introduzca en la cámara de combustión será mayor, sería menester aumentar el volumen de la mezcla, sin embargo, asimismo afectaría la cantidad de aire que se puede introducir y se asimilaría como una reducción en la potencia del motor, si se reduce la cantidad de aire se disminuye el potencial del motor que

igualmente pasa con el hidrógeno, sin embargo, el hidrógeno tiene un poder calorífico mayor lo que reemplazaría en parte la leve reducción del elemento dentro de la mezcla que por propiedades daría la siguiente afirmación; el hidrogeno permite la reducción de gases contaminantes como el N_2O , la mezcla se puede quemar en su totalidad aumentando el potencial y la eficiencia en general del motor [35].

Uno de los problemas principales, que al mismo tiempo es una propiedad del elemento hace alusión a que el hidrógeno es mucho más inflamable que la gasolina, se debe tener en cuenta la chispa de ignición principalmente porque el ángulo de posición del pistón va acorde con el tipo de combustible, por ejemplo para la gasolina el ángulo estaría ubicado entre 17 y 23 grados de giro antes del punto muerto superior (PMS); para el hidrogeno se tendrían que hacer pruebas experimentales y cálculos con los cuales deberían realizarse cambios en el motor [36].

Cuando se habla de hidrógeno en motores de combustión interna se entiende que hay una serie de cambios físicos en el motor ya que están configurados para gasolina, diésel o gas natural.

Si son motores que funcionan con gasolina y el aditivo es el hidrogeno hay que tener en cuenta que la mezcla en su totalidad es combustible, aire e hidrogeno, uno de los primeros cambios obligatorios sería modificar el ángulo de ignición del motor, si inicialmente se encendiera con hidrogeno o solo se implementaría el hidrogeno cuando el motor esté encendido a causa de la gasolina, es algo que se debe analizar para llevarlo a la práctica.

Según un estudio realizado por la universidad Pública de Navarra el ángulo apropiado para la implementación de hidrógeno en un motor de combustión interna sería alrededor de 15° [37]. A continuación, se muestra un esquema de Presión vs Ángulo de giro en la Fig.4

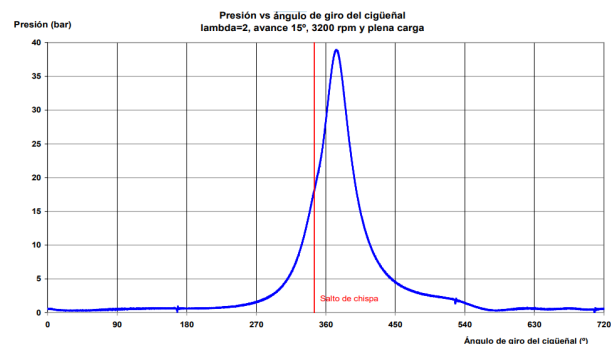
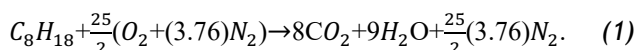


Fig.4. Presión vs ángulo de giro del cigüeñal $\lambda=2$, avance 15°, 3200 rpm y plena carga. [37]

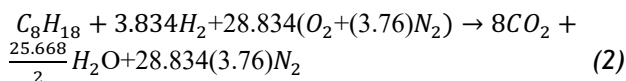
Otro cambio que sería necesario hacer estaría relacionado con las bujías ya que, dependiendo de la mezcla ideal inicial, si es de gasolina, serían las bujías las que se configurarían para el motor, pero si fuera el inicio con hidrogeno estas deben ser reemplazadas por bujías con punta de iridio que no actuarían como un catalizador y así se pueden evitar las zonas de preignición.

En conclusión, se tendrían las dos clases de bujías dependiendo de la mezcla, otro cambio importante es el aceite; este es importante ya que ayuda a evitar una serie de inconvenientes como puntos calientes en el motor, pirolisis y preignición, a ciencia cierta se podrían utilizar aceites sintéticos para evitar los inconvenientes anteriormente enunciados y cabe resaltar que se debe tener una bomba de aceite apropiada ya que el aceite ayudado por la gravedad lubrica los pistones y es cigüeñal del motor [37].

Al analizar todo lo anterior se debe tener en cuenta cómo se va a realizar la inyección del hidrógeno en el motor y cuál sería el sistema ideal para su correcto funcionamiento, existen algunos métodos que se pueden emplear como, por ejemplo, *la inyección directa*, consta de introducir el hidrogeno a la cámara de combustión teniendo el suficiente oxígeno para su correcta combustión, o de *forma indirecta*, que es una secuencia con el combustible gasolina-aire; este consiste en que en el momento en el que la cámara se esté llenando de aire automáticamente se va inyectando paulatinamente el hidrogeno para luego hacer la mezcla total en la cámara de combustión, en primer lugar esto se logra a partir de una ecuación estequiométrica Ec.1 en la que se emplea solamente aire y gasolina.



Posterior a eso se desarrolla una segunda ecuación estequiométrica ecuación 2 en la que se aplica el hidrógeno y se hace el respectivo balance.



Cabe resaltar que la cantidad de hidrógeno inyectado debe ser prácticamente exacto debido a que, si no se aplica la cantidad necesaria, bien sea falta de hidrógeno o exceso de hidrógeno, podría generar problemas graves en el desarrollo del experimento tales como una explosión no controlada o desaprovechamiento de la mezcla.

Según un estudio hecho por la Universidad Tecnológica Equinoccial, se demuestra que una mezcla de aire-combustible-hidrógeno debe estar proporcionada en

cantidades apropiadas para obtener los mejores beneficios, más exactamente son 3.86 moles de hidrógeno. Se puede apreciar que al mezclar el hidrógeno directamente con el combustible, resulta en una compatibilidad favorable para el sistema [38].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cada una de las siguientes pruebas mencionadas se realizaron sistemas de inyección de hidrógeno el cual se obtiene a partir del proceso de electrólisis [39].

Cabe mencionar que el electrolito empleado debe ser diferente a cualquier otro conocido como el bicarbonato de sodio, ya que este produce CO₂ y se estarían produciendo demasiados efluentes en el proceso de electrólisis, en este caso el agua empleada tuvo que ser previamente tratada usando electrolitos tales como hidróxido de sodio, también conocido como soda caustica, este tipo de elementos debieron ser tratados con rigurosa cuidado y con todas las prevenciones de seguridad debido a que estos componentes son altamente peligrosos y corrosivos en la piel.

El montaje del sistema de inyección de hidrógeno a la cámara de mezcla [40] tuvo como principio emplear una celda seca de hidrógeno y oxígeno (HHO) la cual tuvo que ser conectada a una fuente de voltaje teniendo en cuenta que debía existir un sistema de protección de sobrecargas, con lo mencionado anteriormente se logra la electrólisis y obtención del hidrógeno gaseoso.

Este gas debe realizar un recorrido a través de unos cilindros que llegan a un tanque de almacenamiento del electrolito (el electrolito es el que produce el burbujeo). Este gas pasa por una manguera seguido a un filtro secador que es conectado a otra manguera directamente al filtro de aire del motor.

Finalmente, esta llega a la cámara de mezcla donde se tenía aire, gasolina e hidrógeno. Una vez se tenía la mezcla apropiada, se produjo ignición y se realizaron las distintas comparaciones. El diseño a grandes rasgos del montaje se puede apreciar en la Fig.5.

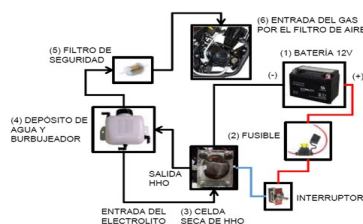


Fig.5. Esquema de montaje sistema de producción HHO. [41]

A continuación, se presenta la tabla 4. en la cual se puede apreciar una comparación realizada en un motor de combustión interna inyectando hidrógeno en la cámara de mezcla y usando única y exclusivamente gasolina.

En este experimento se tomó un intervalo de 5 minutos con el motor encendido, para cada fase del experimento se usaron entre 780 revoluciones por minuto (RPM) mínimas y 8500 (RPM) máximas respectivamente, primero con hidrógeno y luego con solamente la gasolina, cabe resaltar que la velocidad de giro del motor, es decir, las revoluciones por minuto del motor son vitales para esta investigación ya que con esta se logran comparar los resultados del motor empleando solamente gasolina y mezcla de hidrógeno-gasolina.

Parámetros de hidrogeno: PH
Medición: M
Parámetros de la gasolina: PG
Resultado: RTD
Desplazamiento: λ
Contaminación: CTCION
Nom: Nominal
Vol: Volumen

Tabla 4. Parámetros de medición del hidrógeno V.S Gasolina. [42]

PH	M1	M2	PG.	M1	M2
RTD	RTD	RTD	RTD	RTD	RTD
Hora	12:05:2	12:10:3	Hora	12:38:0	12:40:2
800rpm	N/A	N/A	800 rpm	-	-
CO% Vol.	N/A	N/A	CO% Vol.	0.22%	0.20%
CO2% Vol.	0.00	0.00	CO2% Vol.	0.5%	0.3%
O2% Vol.	0.00	0.00	O2% Vol.	0	0
λ	N/A	N/A	λ	N/A	N/A
Vol.	N/A	N/A	Vol.	N/A	N/A
Rpm(v/min)	779	780	Rpm(v/min)	767	640
Rpm(v/nom)	1200	1267	Rpm(v/nom)	1168	1348
Rpm(v/max)	8500	8575	Rpm(v/max)	8700	9000
Temp. °C-800rpm	67	69	Temp. °C-800rpm	63	66
Temp. °C-9000rpm	72	74	Temp. °C-9000rpm	70	74
Total, Hidrogeno	N/A	N/A	Total, Hidrogeno	N/A	N/A
CTCION	N/A	N/A	CTCION	N/A	N/A
Oxido de carbono	0.0%co	0.0%co	Oxido de carbono	0.2%co	0.2%co

Los resultados fueron bastante favorables ya que en costado izquierdo de la tabla se muestran los resultados respectivos de las variables de análisis para el hidrógeno se puede apreciar que el porcentaje de monóxido de carbono y dióxido de carbono producido es casi del 0%, mientras que usando gasolina solamente, hay una producción entre 0.2%

a 0.22% de monóxido de carbono y entre 0.3% y 0.5% de dióxido de carbono.

Un estudio hecho por la universidad Tecnológica Equinoccial revela que al añadir hidrógeno a la cámara de mezcla con aire-combustible tradicional, *la potencia del motor mejoro hasta un 16.7% y el consumo de combustible disminuyo de 401.61 g/kWh a 395 g/kWh [43]*. Asimismo, se produjo una reducción de gases contaminantes considerable, también se puede observar que en las tablas 5. y la tabla 6., se logró una comparación al utilizar un motor con mezcla de gasolina e hidrógeno y el otro con gasolina únicamente, cada uno empleando la misma velocidad de giro, es necesario indicar que los niveles de carga son adimensionales ya que estos se presentan únicamente para indicar el número de interacciones.

Tabla 5. Resultados de pruebas del motor mono cilíndrico sin ingreso de hidrógeno en el dinamómetro. [43]

Nivel carga	RPM	Voltaje	Amperaje	Pot (W)	Pot (Hp)
1	3600	90	2	180	1,091
2	3500	80	3	240	1,454
3	3400	71	7	497	3,011
4	3300	60	9	540	3,272
5	3200	52	12	624	3,781
6	3000	41	13	533	3,229
7	2700	35	15	525	3,181
8	2400	31	16	496	3,005

Tabla 6. Resultados de pruebas del motor mono cilíndrico con ingreso de hidrógeno en el dinamómetro. [43]

Nivel carga	RPM	Voltaje	Amperaje	Pot (W)	Pot (Hp)
1	3600	100	2	200	1,212
2	3500	91	4	364	2,205
3	3400	85	6	510	3,090
4	3300	70	11	770	4,665
5	3200	67	10	670	4,060
6	3000	58	11	638	3,886
7	2700	47	12.5	587.5	3,560
8	2400	39	14	546	3,308

Para esta investigación se empleó un motor generador accionado por un motor de combustión interna mono cilindro. A continuación, se muestran las características de los motores que fueron empleados, tabla 7.

Tabla 7. Características del motor de combustión interna mono cilindro y del motor generador. [44]

MOTOR MC.	Modelo	TEMCO 160
	Tipo	Cilindro simple 4 tiempos OHV
	Cilindraje	163 cm ³
	Relación de compresión	8.5:1
	Frecuencia de giro (RPM)	3600
	Torque máximo	10/2500
	Consumo de combustible (g/kWh)	395
	Sistema de ignición	Magneto con transistor
	Capacidad de aceite (L)	0.6
	Capacidad de gasolina (L)	3.6
MOTOR G.	Frecuencia	60Hz
	Potencia de salida continúa	2700 W
	Potencia de salida máxima	3000 W
	Regulación de voltaje	Regulado por condensador
	Frecuencia de giro/peso	3000 RPM / 38 kg

Sin lugar a dudas la mezcla de hidrógeno mejora significativamente la potencia del motor teniendo como máxima potencia 4,665 HP a 3300 RPM.

Finalmente, en la Fig.6. se pueden ver los resultados de las variables de análisis del motor como lo son el voltaje, amperaje y potencia utilizando solamente gasolina.

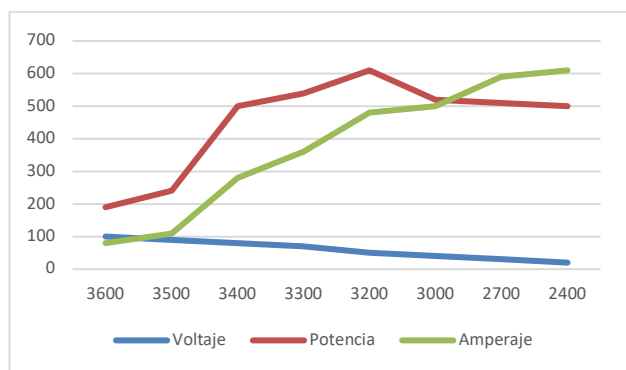


Fig. 6. Resultados de prueba del motor mono cilindro sin ingreso de hidrógeno. [45]

Y en la fig. 7. se puede apreciar la comparación de los resultados anteriores dando a entender que cuando se emplea hidrógeno las líneas de tendencia son mucho más uniformes y estables.

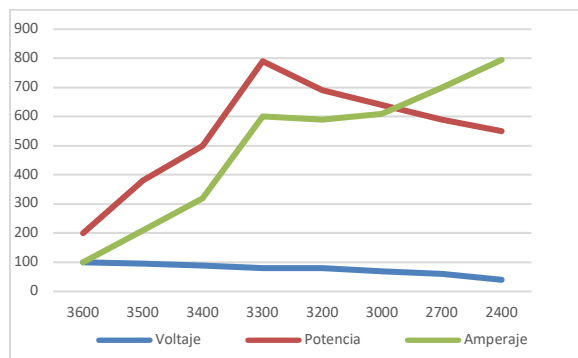


Fig.7. Resultados de prueba del motor mono cilíndrico con ingreso de hidrógeno. [45]

Un estudio en Malasia utilizó diferentes mezclas de gasolina con hidrógeno en motocicletas de 10 años de antigüedad [46], las características de los motores empleados que se muestran en la tabla 8. fueron las siguientes.

Tabla 8. Características de los motores empleados en la experimentación. [47]

Motor	Enfriado por aire, Mono cilindro, Carrera 4 SI
Diámetro del cilindro.	70mm
Carrera del cilindro.	66.7mm
Potencia nominal	2.5kW
Velocidad constante	3000rpm
Sistema regulador	Centrífugo mecánico
Radio de compresión	4.3:1

Los resultados arrojaron que el rendimiento de la combustión y eficiencia del motor incrementaban en un 23%, esto se da debido a que en el momento en el que se mezcla el combustible con el hidrógeno la combustión es mucho más pura y menos demandante para el sistema además de que la pérdida de energía por calor disminuye. Cabe resaltar que cuando surge la combustión dentro del motor al existir la presencia de hidrógeno cuando se da la fase el escape o emisión de gases se encuentra en estado de vapor de agua, es decir que, a su vez la producción de CO₂ y otros gases contaminantes se reduce [47].

Una empresa colombiana llamada Sistema Ecológico Universal actualmente implementa un sistema de mezcla de hidrógeno con combustible convencional arrojando resultados de ahorro entre un 15% a un 35% dependiendo del combustible que se emplee [48].

En cada uno de los casos se logra identificar que la mezcla de hidrógeno con combustible es compatible en cantidades específicas, ya que si se añade un porcentaje más alto este podría llegar a provocar incendios o explosiones debido a la alta inflamabilidad de hidrógeno [49].

Por esta misma razón la potencia aumenta considerablemente ya que cuando se produce la ignición, se obtiene mucha más energía de la que se produce con la mezcla aire-combustible tradicional.

Cuando se producen los gases de la combustión en la cámara de mezcla al tener hidrógeno, en el momento en el que este se queme se obtendrá vapor de agua y una reducción notoria en gases tales como los óxidos nitrosos y dióxido de carbono.

En cada uno de los estudios realizados se obtuvo una comparación de los motores empleando la mezcla de gasolina-aire y mezcla aire-gasolina-hidrógeno. Evidentemente en cada uno de ellos se aprecia como con el mismo uso volumétrico de la mezcla la potencia, el consumo específico y el escape de gases mejoraron considerablemente.

Al principio se pensó que la mezcla directa de un combustible tradicional con el hidrógeno podría no ser compatible resultando en situaciones no deseadas como incendios o explosiones.

Afortunadamente se logra demostrar en cada uno de los experimentos mencionados utilizando una ecuación estequiométrica se logró balancear satisfactoriamente la porción de hidrógeno que debe ser inyectado o suministrado en la cámara de mezcla junto con el combustible tradicional.

Debe existir un balanceo químico entre la inyección de hidrógeno y la gasolina, diésel o gas, con el fin de que no se produzca un exceso o falta de este elemento, esto con el fin de lograr los resultados deseados de eficiencia y disminución de obtención de elementos nocivos en el escape de gases. Una vez se lograron calcular las ecuaciones adecuadas para esta función, se continúa añadiendo el hidrógeno para continuar con la propuesta. El hidrógeno permite que las fluctuaciones en la combustión sean mucho más uniformes gracias a su poder calorífico y mejoran la eficiencia del motor gracias a que permite que la chispa (Si se habla de motores con gasolina o gas) o compresión (Si se habla de motores diésel) sean más efectivas y puedan aprovecharse mucho más los recursos.

Con base en lo anterior y que se está usando una mezcla de combustible con hidrógeno y que el hidrógeno tiene un alto nivel energético [49], el uso de la mezcla es mucho menor,

ya que requiere menos volumen para generar movimiento y el ahorro de recursos es sencillamente notorio. Cuando los gases del sistema son expulsados resulta en una reducción significativa de N_2O y CO_2 , que fue el objetivo principal de toda la investigación [49].

4. CONCLUSIÓN

Los motores de combustión interna han estado presentes desde hace años en el mundo y por eso mismo son una parte muy importante de la cotidianidad, cada vez más demuestran un avance tecnológico y dan un paso significativo a la evolución de transporte y vida diaria. Los motores de combustión interna cuentan con una utilidad imprescindible ya que con estos se realizan distintas tareas y actividades de una manera mucho más sencilla y eficaz.

Los MCI generan una gran cantidad de gases tóxicos en el planeta, pero no por esto se pueden dejar a un lado y mucho desechar, debido a que estos ya hacen parte de nuestra vida actual, por esto mismo se deben seguir buscando día a día nuevas formas de utilizarlos más limpia y eficientemente para que puedan seguir cumpliendo con su función principal, de una manera más limpia y segura para los seres humanos, la naturaleza y el mundo.

El hidrógeno podrá contemplarse como una buena opción en el futuro, es claro que se evidencian avances significativos y su alta eficiencia está comprobada, las pruebas resaltan la efectividad del hidrógeno en todos los aspectos posibles como lo son la eficiencia del motor mismo y en especial la reducción de polución y gases contaminantes.

Es claro que la implementación mundial del hidrógeno tomará varios años no sólo por su complejidad y costo sino también por factores políticos, sociales y económicos. Para nadie es un secreto que la industria petrolera aun cuenta con mucho poder en el mundo y representarán un obstáculo gigante en el avance de la implementación total del hidrógeno, sin embargo, los avances continúan y la vida misma evoluciona.

Algún día se hablará de cómo los combustibles fósiles quedaron atrás y una nueva era de combustible no contaminantes son los que mandaran la parada.

Es notoria la compatibilidad que existe en los combustibles tradicionales con el hidrógeno y se puede evidenciar claramente su buena reacción ante la mezcla de estos que, aunque no se pueda usar un porcentaje más alto de hidrógeno, aun con esta pequeña parte, se logran resultados

excelentes.

Puede que tome algunas décadas la implementación de este tipo de combustible en el mundo, pero una vez logrado este cometido, se podría contemplar un escenario donde el mundo es más limpio y el ambiente es más sano para la población.

La propuesta de mezclar combustible tradicional junto con hidrógeno es totalmente posible y en unos cuantos años se podría estar implementando en los automóviles en Colombia o específicamente Bogotá.

5. AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este trabajo a mi familia que siempre me ha apoyado en mis estudios universitarios. Siempre me han impulsado a seguir adelante y nunca darme por vencido pese a los obstáculos en el camino.

Quiero agradecer también al profesor Vladimir Silva, que fue mi tutor y me proporcionó cada una de las herramientas necesarias para obtener información adecuada y precisa en el desarrollo de mi investigación.

Finalmente, agradezco a la Universidad ECCI por siempre facilitarme fuentes de información adecuadas, brindarme una educación de la mejor calidad y pensar siempre en sus estudiantes primero.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ortiz Sánchez Daniel Fernando, Pardo Castillo May Cristhofer, Evaluación Del Rendimiento De Un Motor De Cuatro Tiempos, Usando Hidrógeno Como Combustible, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López Mayo 2019.

[2] Jaime Ramírez Garduño, Caracterización de los parámetros de un motor de combustión interna mediante la comunicación. Mayo 2016

[3] Marc Fábrega Ramos, Manuel Rodríguez Castillo, Hidrógeno: Aplicación En Motores De Combustión Interna, Facultad de Náutica de Barcelona 2008-2009.

[4] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Gobierno de España. Gases licuados del Petróleo. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/energia/GLP/Paginas/Index.aspx> [consultado el 16 de enero de 2021]

[5] Ángel F. Moreira-Romero, Contaminación del aire en el medio ambiente por las emisiones de gases tóxicos de empresas industriales en Ecuador. 10.23857/pc.v3i7.553 2018

[6] Bach. Johon Elvis Larico Ajata, Adaptación De Un Motor De Combustión Interna Usando Hidrogeno Como Combustible Para Reducir Emisiones De Gases Contaminantes, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez 2018.

[7] Análisis de gases, Disponible en: <https://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/ANALISIS+DE+GASES.pdf> [Consultado 15 de agosto 2017]

[8] ¿Apilados, el hidrógeno es peligroso? Disponible en: <http://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/> [Consultado 12 de agosto 2018]

[9] John A. Turner, Sustainable Hydrogen Production 10.1126/science.1103197, October 19, 2007

[10] David Sáinz Casas, Universidad Pública de Navarra, Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de automoción. Noviembre de 2014.

[11] Michael Ball, Martin Wietschel, The future of hydrogen opportunities and challenges, 10.1016/j.ijhydene.2008.11.014

[12] Ibrahim Dincer, Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Sustainable Future, 1995-6665, Mar. 2008.

[13] Producción de hidrógeno, Producción de hidrógeno por electrólisis, disponible en: <https://producciondehidrogenoporelectrolisis.wordpress.com/propiedades-del-hidrogeno/> [Consultado en 2016]

[14] Huang, Shengjun; Hara, Kenji; Fukuoka, Atsushi, Green catalysis for selective CO oxidation in hydrogen for fuel cell, Energy Environ. Sci., 2009, 2, 1060-1068

[15] D. Luis Vidal Fierro, Facultad de ciencias Económicas y Empresariales Universidad de León, El sector del automóvil en España. Análisis de los concesionarios, Julio de 2018.

[16] Lain Stafell, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shah and Kate R. Ward, The role of hydrogen and fuel cells

in the global energy system, 10.1039/c8ee01157e.

[17] Bent Sorensen, Hydrogen And Fuel Cells, 978-0-12-387709-3.

[18] Ángel Orlando Díaz, Jonathan Gonzales, Octavio Andrés Gonzales, Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. 10.18273/revuin.v17n1-2018013.

[19] G.W. Crabree, M.S. Dresselhaus, The Hydrogen Fuel Alternative, 200.118.62.36.

[20] Johannes Topler, Jochen Lehmann, Hydrogen and Fuel Cell Technologies and Market Perspectives, 10.1007/978-3-662-44972-1, 2014

[21] Dolf Gielen, Giorgio Simbolotti, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, TRB, Washington DC, 25 January 2006.

[22] Joel Ramírez Salgado, Arquímedes Estrada Martínez, Roadmap towards a sustainable hydrogen economy in Mexico. 10.1016/j.jpowsour.2003.11.054

[23] Shoji Kamiya, Motohiko Nishimura, Eichi Harada, Study on Introduction of CO₂ Free Energy to Japan with Liquid Hydrogen. 10.1016/j.phpro.2015.06.004

[24] Richard Adnan Montagne Velásquez, Diseño de un generador de hidrogeno como combustible para los motores de combustión de ciclo otto en la región Puno-2015, Puno-Perú 2016.

[25] Jason Armando, Campos Pérez, Universidad Católica De Santa María Facultad De Ciencias E Ingeniería Electrónica, Diseño e implementación de un sistema de inyección de hidrógeno a un motor de combustión interna, 2013.

[26] Paloma Asensio, Energías renovables para todos, Hidrógeno y Pila De Combustible.

[27] Roald A.A. Suurs, Marko P. Hekkert, Ruud E.H.M. Smits, Understanding the build-up of a technological innovation system around hydrogen and fuel cell technologies, 10.1016/j.ijhydene.2009.09.092.

[28] Huang, Shengjun; Hara, Kenji; Fukuoka, Atsushi, Green catalysis for selective CO oxidation in hydrogen for fuel cell, 2009-10.

[29] Svetlana M. Mitrovski and Ralph G. Nuzzo. A passive

microfluidic hydrogen-air fuel cell with exceptional stability and high performance, 10.1039/b513829a

[30] Igor Matutinovic, Oil and the political Economy of energy. 10.1016/j.enpol.2009.05.024

[31] Colombia SISTEMA DE HIDROGENO VEHICULAR-hidrogeno vehicular en Colombia. Disponible en: <http://www.hidrogenovehicularcolombia.com> [consultado el 16 de enero de 2021]

[32] Haley Kreutzer, Venkata Yarlagadda, Trung Van Nguyen, Performance Evaluation of a Regenerative Hydrogen-Bromine Fuel Cell, 10.1149/2.086207jes.

[33] Edison Miguel Quezada, Diego Fernando Torres, Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6L. diciembre 2014

[34] Jorge M. Rodríguez Matienzo, Alejandro Domínguez Valdés, Influencia de la adición de hidrógeno producido on board en el funcionamiento de un motor diésel estacionario, IX Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética. CIER 2017.

[35] Ali T-Raissi, AT-R, Hydrogen: Automotive fuel of the future, 10.1109/MPAE.2004.1359020.

[36] Johannes Töpler, Jochen Lehmann, Hydrogen and Fuel Cell, 10.1007/978-3-662-44972-1.

[37] John A. Turner, Sustainable Hydrogen Production, 10.1126/science. 1103197

[38] Edwin Tamayo, Carlos Rosales, Alex Guzmán, Paúl Pazmiño, Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna, 10.29019.

[39] Fredy Ladislao Jiménez Sáez, Transelec S.A; Universidad de Chile Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Evaluación Técnica Y Económica Del Uso De Hidrógeno Verde En Aplicaciones Para La Industria Y Desplazamiento De Combustible Fósil, 2020.

[40] Ángel Orlando Díaz-Rey, Jonathan Eduardo Gonzáles, Octavio Andrés Gonzáles-Estrada, Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna, octubre 25, 2017.

[41] Salazar Lozano, Mariano José, Sistema para aprovechamiento de la energía eólica a baja escala y su acumulación en forma de hidrógeno, Julio 2016.

[42] José Alejandro Chávez Marín, Roberto Leiva-Illanes, Motor de combustión interna adaptado para funcionar con hidrógeno autogenerado mediante electrólisis, 2018.

[43] Paul E. Dodds, Iain Stafell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grünewald, Will McDowall, Paul Ekins, Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review, 10.1016/j.ijhydene.2014.11.059.

[44] Aprovechamiento de recursos energéticos renovables, disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Capitulo+2+-+Producción+de+Hidrógeno.pdf> [Consultado 7 de febrero 2015]

[45] Autocosmos - ¿Cómo funcionan las celdas en un auto de hidrógeno? Disponible en: <https://noticias.autocosmos.com.mx/2015/07/28/como-funcionan-las-celdas-en-un-auto-de-hidrogeno> [Consultado 28 de Julio 2015]

[46] Xiumin Yu, Guanting Li, Yaodong Du, A comparative study on effects of homogeneous or stratified hydrogen on combustion and emissions of a gasoline/hydrogen SI engine

[47] Suhas B.G, EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SINGLE CYLINDER 4S SI ENGINE WITH HYDROGEN BLENDS, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), ISSN 0976 – 6340

[48] Solverdca – Motor de combustión interna y partes que lo integran. Disponible en: <http://www.solverdca.com.ar/motor-de-combustion-interna-partes-que-lo-integran/> [Consultado en 2019]

[49] Michael Ball, Martin Wietschel, The future of hydrogen-opportunities and challenges, 10.1016/j.ijhydene.2008.11.014.