

CARACTERIZACIÓN DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN DIFERENTES CONDICIONES DE VELOCIDAD MEDIANTE MEZCLA DE HIDRÓGENO, GASOLINA Y GAS NATURAL VEHICULAR.

LINARES GONZALEZ CRISTIAN ENRIQUE    COD: 20961  
GUZMAN BELLO NURY CONSTANZA    COD: 1774

UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA  
BOGOTÁ- COLOMBIA  
SEPTIEMBRE 2018

CARACTERIZACIÓN DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN DIFERENTES CONDICIONES DE VELOCIDAD MEDIANTE MEZCLA DE HIDRÓGENO, GASOLINA Y GAS NATURAL VEHICULAR.

LINARES GONZALEZ CRISTIAN ENRIQUE COD: 20961

GUZMAN BELLO NURY CONSTANZA COD: 1774

DIRECTOR:

Msc. –Ing. JIMMY BARCO BURGOS

UNIVERSIDAD ECCI

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

BOGOTÁ- COLOMBIA

SEPTIEMBRE 2018

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme permitido llegar a este punto, dándome salud y fortaleza para seguir con mis estudios y objetivos sin importar los obstáculos que se presenten.

A mi hijo Derek Zahir Méndez Guzmán porque sin duda alguna fue un apoyo para poder culminar esta etapa, dándome motivación y aliento para seguir los objetivos planteados, por su paciencia en todos los momentos que no pudimos compartir por estar en diferentes actividades académicas.

A mis padres Luis Alfonso Guzmán y Olga Yolanda Bello por la confianza brindada en todo mi proceso universitario, por sus consejos, motivación constante que me han permitido ser una persona de bien.

A mis hermanas Olga y Liliana que me enseñaban con gran ejemplo a ser perseverante y seguir el camino que uno empieza sin desfallecer.

Por ultimo quiero dedicarle este proceso a alguien que llego a mi vida a cambiar la perspectiva y la forma de ver las cosas a mi alrededor un gran ingeniero que con su positivismo y su forma de ver el mundo me ha hecho mejorar como persona y profesionalmente, por su paciencia, conocimiento, ayuda en cada etapa vivida en todo este

## **NURY CONSTANZA GUZMAN BELLO**

A Dios, a la patria y a mi familia, ya el conjunto de estos tres representa en síntesis lo más apreciado de mi vida. A Dios porque según mis conceptos y creencias es el ser supremo, ser al cual debemos la vida; a mi patria porque mi anhelo más grande es de servirle a ella, ayudando al progreso de la población colombiana y contribuir con el desarrollo del país.

A mi padre Carlos Jaime Linares Ordoñez, quien desde pequeño me encamino por el mundo del estudio; quien realizó el esfuerzo más valeroso, pues sacrifico muchas veces su confort a cambio de mí bienestar, el de mi hermano y el de mi madre.

A mi madre Nubia Stella González Linares, quien me enseñó a ver la vida con responsabilidad, aquella mujer que corrigió mis errores a tiempo, quien sacrifico su juventud para convertir a sus dos hijos en personas de bien.

A mi hermano Carlos Antonio Linares González, ya que él fue mi soporte en los momentos más duros; por darle alegría a mi vida, por enseñarme que, aunque ni siquiera la pelea más dura podrá impedir que un hermano este allí dispuesto siempre para ayudar incondicionalmente.

A mis abuelos miguel Antonio González Maldonado y Romulo Linares (Q.E.P.D) por sus enseñanzas y cuidados, pues mientras el primero me enseñó a valorar el trabajo, el otro me enseñó la virtud de la paciencia; a mi abuela Amanda Linares.

## **LINARES GONZALEZ CRISTIAN ENRIQUE**

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por darnos vida, salud y licencia para lograr concluir satisfactoriamente esta tesis como opción de grado; a nuestra alma mater, la Universidad ECCI por poner a nuestra disposición aquellos excelentes ingenieros con cualidades de docencia que aportaron un aprendizaje en nosotros, y por ende cambiaron nuestro comportamiento al sumergirnos en los bastos campos de conceptos, leyes y principios en los cuales se basa la ingeniería mecánica.

Al Ing. Jimmy Barco Burgos quien fuera el tutor asignado para este proyecto, tutor con el cual le debemos su paciencia y disposición de servicio, pues no se conformó solo con guiarnos y corregirnos en el desarrollo de este proyecto sino también aporta nuestro crecimiento personal y profesional con sus consejos.

Al Ing. Andrés Ricardo Guevara Umaña (Jefe de laboratorios) y por sobre todo al Ing. Edison Jhovany Barbosa Tautiva (Laboratorista); personas encargadas de garantizar el trabajo seguro en los talleres de la facultad de ingeniería mecánica, porque sin su apoyo no se hubiera podido haber realizado la etapa experimental del proyecto.

## Tabla de contenido

TÍTULO DEL PROYECTO .....	12
1. RESUMEN DEL PROYECTO .....	12
2. ABSTRAC .....	14
3. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
4. JUSTIFICACIÓN .....	17
5. ANTECEDENTES .....	18
6. OBJETIVOS .....	21
6.1. OBJETIVO GENERAL .....	21
6.2. Objetivos Específicos .....	21
7. EL MARCO TEÓRICO.....	22
8. DISEÑO METODOLÓGICO .....	27
8.1. FASE DE DESARROLLO.....	27
8.2. INSTRUMENTACIÓN DEL MOTOR .....	31
8.3. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR MONTAJE.....	32
8.3.1. MONTAJE DEL ESCÁNER .....	32
8.3.2. MONTAJE DE LA BALANZA .....	33
8.3.3. MONTAJE DEL ANALIZADOR DE GASES.....	34
8.3.4. MONTAJE DE SISTEMA ADQUISICIÓN DE DATOS.....	35
8.3.5. ALISTAMIENTO DE HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN .....	37
8.3.6. DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL .....	37
9. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	42
10. ANÁLISIS DE DATOS .....	71
11. CONCLUSIONES .....	78
12. RECOMENDACIONES .....	79
13. REFERENCIAS .....	80

## Tabla de Tablas

Tabla 1 Especificaciones del motor [36].....	24
Tabla 2 Propiedades del combustible [30][37] .....	24
Tabla 3 Ficha técnica de componentes figura 6. ....	29
Tabla 4 Descripción actividades a realizar durante tiempo de experimentación .....	38
Tabla 5 Tabla de pruebas realizadas a lo largo de la experimentación .....	40
Tabla 6 Consumo 1000 RPM 5 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	42
Tabla 7 Consumo 1000 RPM 10 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	42
Tabla 8 Consumo 1000 RPM 15 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	43
Tabla 9 Consumo 1000 RPM Amp Max Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	43
Tabla 10 Consumo 1500 RPM 5 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	43
Tabla 11 Consumo 1500 RPM 10 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	44
Tabla 12 Consumo 1500 RPM 15 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	44
Tabla 13 Consumo 1500 RPM Amp Max Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	44
Tabla 14 Consumo 2000 RPM 5 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	45
Tabla 15 Consumo 2000 RPM 10 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	45
Tabla 16 Consumo 2000 RPM 15 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	45
Tabla 17 Consumo 2000 RPM Amp Max Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	46
Tabla 18 Consumo 2500 RPM 5 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	46
Tabla 19 Consumo 2500 RPM 10 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	46
Tabla 20 Consumo 2500 RPM 15 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	47
Tabla 21 Consumo 2500 RPM Amp Max Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	47
Tabla 22 Consumo 3000 RPM 5 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	47

Tabla 23 Consumo 3000 RPM 10 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	48
Tabla 24 Consumo 3000 RPM 15 Amp Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	48
Tabla 25 Consumo 3000 RPM Amp Max Gasolina – Celda HHO a NaOH 40%.....	48
Tabla 26 Consumo 1000 RPM Gasolina.....	49
Tabla 27 Consumo 1500 RPM Gasolina.....	49
Tabla 28 Consumo 2000 RPM Gasolina.....	50
Tabla 29 Consumo 2500 RPM Gasolina.....	50
Tabla 30 Consumo 3000 RPM Gasolina.....	50
Tabla 31 Consumo 1000 RPM Gasolina – Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones ...	51
Tabla 32 Consumo 1500 RPM Gasolina – Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones ...	52
Tabla 33 Consumo 2000 RPM Gasolina – Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones ...	53
Tabla 34 Consumo 2500 RPM Gasolina – Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones ...	54
Tabla 35 Consumo 3000 RPM Gasolina – Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones ...	55
Tabla 36 Consumo 1000 RPM Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones de amperaje	56
Tabla 37 Consumo 1500 RPM Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones de amperaje	57
Tabla 38 Consumo 2000 RPM Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones de amperaje	58
Tabla 39 Consumo 2500 RPM Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones de amperaje .....	59
Tabla 40 Consumo 3000 RPM Celda HHO NaOH 40% Diferentes condiciones de amperaje	60
Tabla 41 Tabla Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH .....	61
Tabla 42 Tabla consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH .....	62
Tabla 43 Análisis de gases a 1000 RPM gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente .....	63
Tabla 44 Análisis de gases a 1500 RPM gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones	

de corriente .....	63
Tabla 45 Análisis de gases a 2500 RPM gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente .....	64
Tabla 46 Análisis de gases a 3000 RPM gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente .....	64
Tabla 47 Análisis de gases a 1000 RPM gas natural vehicular- HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente.....	65
Tabla 48 Análisis de gases a 2500 RPM gas natural vehicular- HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente.....	65

## Tabla de Figuras

Figura 1 Celda de electrólisis alcalina [35] .....	23
Figura 2 Celda de electrolisis alcalina .....	25
Figura 3 Depósito de combustible .....	25
Figura 4 Esquema ejecución experimental .....	26
Figura 5 Montaje de motor de combustión interna .....	28
Figura 6 Esquema montaje motor de combustión interna. ....	29
Figura 7 Flujograma para realizar la instrumentación del motor .....	31
Figura 8 Flujograma para el montaje del escáner automotriz .....	33
Figura 9 Flujograma para el montaje la balanza .....	34
Figura 10 Flujograma para el montaje del analizador de gases .....	35
Figura 11 Flujograma para el montaje del Sistema de adquisición de datos .....	36
Figura 12 Flujograma del proceso de realización de la prueba .....	39
Figura 13 Relación pruebas experimentales .....	41
Figura 14 Consumo de gasolina -HHO NaOH 40% a 1000 RPM.....	51
Figura 15 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 1500 RPM .....	52
Figura 16 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 2000 RPM .....	53
Figura 17 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 2500 RPM .....	54
Figura 18 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 3000 RPM .....	55
Figura 19 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 1000 RPM .....	56
Figura 20 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 1500 RPM .....	57
Figura 21 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 2000 RPM .....	58
Figura 22 Consumo de HHO NaOH 40% a 2500 RPM.....	59

Figura 23 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 3000 RPM .....	60
Figura 24 Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH .....	61
Figura 25 Gráfica consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH.....	62
Figura 26 Emisiones de monóxido de Carbono con Gasolina- HHO al 40% NaOH .....	66
Figura 27 Emisiones de dióxido de carbono con Gasolina- HHO al 40% NaOH .....	66
Figura 28 Emisiones de oxígeno con Gasolina- HHO al 40% NaOH .....	67
Figura 29 Factor Lambda con Gasolina- HHO al 40% NaOH .....	67
Figura 30 Emisiones de hidrocarburos pesados con gasolina- HHO al 40% NaOH.....	68
Figura 31 Emisiones de monóxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	68
Figura 32 Emisiones de dióxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH.....	69
Figura 33 Emisiones de oxígeno con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	69
Figura 34 Factor lambda con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	70
Figura 35 Emisiones de hidrocarburos pesados con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	70
Figura 36 Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH .....	72
Figura 37 Gráfica consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH.....	73
Figura 38 Emisiones de hidrocarburos pesados con gasolina- HHO al 40% NaOH.....	75
Figura 39 Factor lambda con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	76
Figura 40 Emisiones de monóxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	77
Figura 41 Emisiones de hidrocarburos pesados con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH .....	77

## Glosario

- **Analizador de gases:** Es un instrumento de medición capaz de medir, generalmente en porcentaje, determinados compuestos químicos contenidos en la masa de los productos gaseosos o no, emitidos por el escape de un motor de combustión interna.
- **Banco de baterías:** Son indispensables en los sistemas tipo aislados, ya que es el dispositivo encargado de almacenar la corriente eléctrica necesaria que demanda el consumidor o usuario y poder alimentar los equipos eléctricos durante la noche o en días que el clima no sea favorable para la producción energía fotovoltaica y hay poca radiación solar.
- **Celda de hidrógeno:** celda electrolisis alcalina en la cual se hace pasar corriente eléctrica de forma continua, con el fin de realizar el proceso de electrolisis, proceso por el cual se rompen los enlaces entre las moléculas de hidrogeno y oxigeno produciéndose así la separación de los elementos químicos que componen el agua.
- **Celda fotovoltaica:** Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en energía eléctrica, una partícula luminosa con energía (fotón) se convierte en una energía electromotriz (voltaica), de ahí su nombre, fotovoltaico.
- **Electrólisis:** proceso químico que usa la propiedad de la conductividad eléctrica de algunos materiales o sustancias para generar una reacción de oxidación-reducción no espontánea.
- **Energía fotovoltaica:** La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos.
- **Escáner automotriz:** Es un dispositivo el cual se encarga de realizar un auto diagnóstico en todo el automóvil, también puede leer la ECU y así mismo saber que errores presenta. **Tanque De Gasolina:** Contenedor seguro para líquidos inflamables, que forma parte del sistema del motor, y en el cual se almacena el combustible, que es propulsado y mediante la bomba de combustible sea liberado como gas a presión en un motor.
- **Etanol:** compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que puede utilizarse como combustible, solo, o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y su uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de

derivados del petróleo.

- Hidrógeno: El hidrógeno es el elemento más abundante, constituyendo casi tres cuartas partes de la masa del universo. Se encuentra en el agua, que cubre el 70% de la superficie terrestre, y en toda la materia orgánica.
- Inversor: dispositivo que cambia o transforma un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.
- Panel solar: dispositivo para aprovechar la energía solar. También se le puede llamar módulo solar.
- Pirómetro: instrumento que se utiliza para medir temperaturas muy elevadas, que pueden ser superiores a los 600 °C.
- Pwm: Encargado de distribuir y controlar la corriente con la cual se alimentará el generador de oxihidrógeno, este gas será filtrado varias veces, previniendo que vapor de agua o solución electrolítica lleguen al motor afectando el funcionamiento de este.

## TÍTULO DEL PROYECTO

"Caracterización de motor de combustión interna en diferentes condiciones de velocidad mediante mezcla de hidrógeno, gasolina y gas natural vehicular"

### 1. RESUMEN DEL PROYECTO

El transporte es una de las problemáticas más importantes en las zonas urbanas alrededor del mundo. El aumento del costo de combustible, la contaminación ambiental y la congestión en carreteras son algunas de las preocupaciones que han llevado a la necesidad de considerar formas alternativas de transporte y la búsqueda de tecnologías alternas que permitan disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de los motores de combustión interna. Esta problemática ha motivado a investigadores a buscar soluciones que no requieran drásticas modificaciones en el diseño de los motores y que no generen impacto negativo en el rendimiento y los costos de manufactura.

Los combustibles alternativos usados en motores de combustión interna incluyen alcoholes como etanol, gas natural, gas licuado de petróleo, biodiesel, gas de síntesis e hidrógeno. La importancia de usar combustibles alternativos se atribuye a la necesidad de garantizar sostenibilidad energética a través del uso de combustibles derivados de fuentes de energía renovable, mejorar la eficiencia y emisiones del motor y aliviar el uso desequilibrado de combustibles fósiles convencionales basados en petróleo.

El desarrollo de tecnologías para generar hidrógeno, que sean cada vez más fiables, compactas y efectivas; así como el estudio de la integración de estas tecnologías renovables y no renovables como el gas natural a vehículos de uso cotidiano, representa los primeros pasos para la transición energética en nuestro parque automotor; no obstante el diseño de tecnologías como las celdas de combustible y la instalación de sistema de conversión a gas natural vehicular se deben poner a prueba en sistema bi-combustible con el fin de caracterizar el funcionamiento de motores de combustión interna en diferentes condiciones de velocidad mediante mezcla de hidrógeno, gasolina y gas natural vehicular para evaluar su impacto en la reducción de consumo de combustible y disminución de las emisiones contaminantes.

La metodología usada se basará en la revisión bibliográfica de resultados experimentales del proceso de combustión, y sistemas bi-combustible que usan hidrógeno generado a partir de la electrólisis de agua y sistemas comerciales de gas natural vehicular de quinta generación. Asimismo se pondrá a punto el motor de combustión interna, ajustando las características y parámetros del motor a las condiciones de fábrica, paralelamente se hará el mantenimiento

y pruebas de funcionamiento a celdas de electrólisis alcalina y sistemas de gas natural vehicular, además, se realizará montaje experimental para adquisición de datos para generar e interpretar graficas de consumo de combustible y emisiones contaminantes Vs diferentes condiciones de revoluciones de motor, que nos permitan cuantificar los porcentajes máximos alcanzados en reducción de consumo de combustible y emisiones contaminantes.

En síntesis, mediante este proyecto se pretende comprobar experimentalmente el porcentaje de reducción en consumo de combustible y emisiones contaminantes en un motor Aveo 1.6 litros modelo 2007 que se le ha adaptado una celda de generación de hidrógeno y un sistema de gas natural vehicular de quinta generación. Se evaluarán diferentes condiciones de carga y combustible dual (gasolina- hidrógeno y GNV- hidrógeno) alimentado, con el fin de identificar los puntos de óptimo funcionamiento y compararlos con el funcionamiento habitual de un motor mezcla gasolina + aire.

## 2. ABSTRACT

Transportation is one of the most important problems in urban areas around the world. The increase in fuel costs, environmental pollution and road congestion are some of the concerns that have led to the need to consider alternative forms of transport and the search for alternative technologies to reduce fossil fuel consumption and emissions. the internal combustion engines. This problem has motivated researchers to look for solutions that do not require drastic modifications in the design of the engines and that do not generate negative impact on performance and manufacturing costs.

Alternative fuels used in internal combustion engines include alcohols such as ethanol, natural gas, liquefied petroleum gas, biodiesel, synthesis gas and hydrogen. The importance of using alternative fuels is attributed to the need to guarantee energy sustainability through the use of fuels derived from renewable energy sources, improve the efficiency and emissions of the engine and alleviate the unbalanced use of conventional fossil fuels based on petroleum.

The development of technologies to generate hydrogen, that are increasingly reliable, compact and effective; as well as the study of the integration of these renewable and non-renewable technologies such as natural gas to vehicles of daily use, represents the first steps for the energy transition in our automotive fleet; However, the design of technologies such as fuel cells and the installation of vehicular natural gas conversion system must be tested in bi-fuel system in order to characterize the operation of internal combustion engines in different speed conditions by mixing hydrogen, gasoline and vehicular natural gas to evaluate its impact on reducing fuel consumption and reducing polluting emissions.

The methodology used will be based on the bibliographic review of experimental results of the combustion process, and bi-fuel systems that use hydrogen generated from the electrolysis of water and commercial systems of fifth-generation vehicular natural gas. Likewise, the internal combustion engine will be tuned, adjusting the characteristics and parameters of the engine to the factory conditions, parallel to the maintenance and operation tests to alkaline electrolysis cells and vehicular natural gas systems, in addition, assembly will be carried out experimental for data acquisition to generate and interpret graphs of fuel consumption and polluting emissions Vs different rpm conditions, that allow us to quantify the maximum percentages reached in reduction of fuel consumption and polluting emissions.

In summary, this project aims to experimentally verify the percentage reduction in fuel consumption and emissions in a 2007 Aveo 1.6 liter engine that has been adapted to a hydrogen generation cell and a fifth generation natural gas vehicle system. Different loading conditions and dual fuel (petrol-hydrogen and NGV-hydrogen) will be evaluated, in order to identify the points of optimum operation and compare them with the usual operation of a gasoline-air mixture engine.

### 3. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El actual escenario ambiental nos revela que el incremento en la concentración de gases de escape de plantas industriales y automóviles dentro de la atmósfera es una de las mayores causas del calentamiento global [1][2][3]. Hoy en día el suministro energético primario en el mundo, está conformado por un 35 % en petróleo, 29 % en carbón, 22 % en gas natural y 2 % en energía nuclear, esto evidencia la vigente dependencia en fuentes no renovables limitadas por las reservas disponibles. De igual modo la limitada disponibilidad en combustibles renovables ha resultado en un aumento en uso y precio de las fuentes no renovables, las cuales son mayoritariamente usadas para el funcionamiento del sector transporte e industrial [3][4].

El transporte es una de las problemáticas más importantes en las zonas urbanas alrededor del mundo [5]. El aumento del costo de combustible, la contaminación ambiental y la congestión en carreteras son algunas de las preocupaciones que han llevado a la necesidad de considerar formas alternativas de transporte y la búsqueda de tecnologías alternativas que permitan disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de los motores de combustión interna. Esta problemática ha motivado a investigadores a buscar soluciones que no requieran drásticas modificaciones en el diseño de los motores y que no generen impacto negativo en el rendimiento y los costos de manufactura [6].

El gas natural vehicular (GNV) es una de las estrategias claves para la promoción del uso de combustibles alternativos menos contaminantes como un método para lograr la transición a sistemas energéticos renovables. Las importantes reservas, infraestructura de distribución instalada y ventajas comparativas en precios frente a un combustible tradicional como la gasolina, hacen al GNV una opción factible y atractiva para usar como combustible complementario para su uso en motores de combustión interna [7].

Entre las diferentes soluciones, está el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno ( $H_2$ ) que garantiza un aumento en la eficiencia en el motor y la generación de vapor de agua como único subproducto de la combustión [5][8][9]. Aunque este tipo de tecnologías es madura, desde el punto de vista comercial no es posible implementar, ya que la construcción de un sistema generador de hidrógeno, integrado al sistema del motor y los elevados costos de manufactura genera un impacto desfavorable en el precio final del vehículo [10]. A pesar de esto, Para evitar los problemas de almacenamiento, recarga y elevados costos de generación de combustible de hidrógeno, una de las tecnologías más económicas es la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno como único combustible o como combustible complementario para su uso en motores de combustión interna [11].

Por lo tanto, la necesidad de hacer los motores más eficientes, con menor impacto en emisiones contaminantes, usando combustibles alternativos provenientes de fuentes renovables y uso de sistemas auxiliares que puedan ser fácilmente integrados tanto a vehículos nuevos como usados, justifica la caracterización de motor de combustión interna en diferentes condiciones de velocidad mediante mezcla de hidrógeno, gasolina y gas natural vehicular con el fin de evaluar su impacto en la reducción de consumo de combustible y disminución de las emisiones contaminantes.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad hasta el 90% de la propulsión para el transporte depende del motor de combustión interna [12], se espera que la demanda mundial de combustible para el transporte crezca continuamente entre 1,2% y 1,4% por año [13]. Las discusiones sobre el estado actual y futuro del combustible para el transporte son cada vez más importante. En los últimos años los vehículos de gasolina y diésel han pasado a ser mucho más limpios en emisiones contaminantes y en consumo de combustible. Gran parte de estos avances se han centrado en la reducción del tamaño de los vehículos, el uso de catalizadores, mejoras en la eficiencia de los equipos electrónicos y del aire acondicionado, asimismo avances en vehículos de tecnología híbrida y combustibles alternativos [14][15].

Los combustibles alternativos usados en motores de combustión interna incluyen alcoholes como etanol, gas natural, gas licuado de petróleo, biodiesel, gas de síntesis e hidrógeno. La importancia de usar combustibles alternativos se atribuye a la necesidad de garantizar sostenibilidad energética a través del uso de combustibles derivados de fuentes de energía renovable, mejorar la eficiencia y emisiones del motor y aliviar el uso desequilibrado de combustibles fósiles convencionales basados en petróleo [16].

El gas natural tiene aplicaciones en múltiples sectores, por ejemplo: residencial, comercial, industrial, petroquímico, termoeléctrico y transporte (gas natural vehicular - GNV) [17]. Hay tres tecnologías del gas natural en la automoción: los GNV mono-combustible, que emplean únicamente gas natural como carburante; los vehículos bi-combustible, que pueden optar entre gas natural y gasolina; y los GNV a doble combustible, que funcionan con una mezcla de gas natural y gasóleo, cuyas proporciones relativas van cambiando en función de la velocidad del motor y de la carga [14].

Los vehículos a gas natural pueden considerarse bastante limpios, respecto a las emisiones atmosféricas que afectan a la salud humana, como el monóxido de carbono ( $CO$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y los hidrocarburos pesados (HC). Las emisiones reducidas de estos motores presentan, suponen una clara ventaja cuando los vehículos a gas natural vehicular

sustituyen a los diésel, que es generalmente el caso de vehículos industriales [12].

El hidrógeno como combustible alternativo puede ser generado a partir de recursos fósiles, como el gas natural y carbón, así mismo como de fuentes renovables como la biomasa y la electrólisis del agua. Sin embargo, hoy, más del 90 % del hidrógeno producido es derivado de fuentes fósiles [11]. El hidrógeno como combustible para la generación de potencia mecánica tiene dos aplicaciones: Las pilas de combustible y los motores de combustión interna alternativos. En ambas aplicaciones este combustible se combina con el oxígeno, generando electricidad en el caso de las pilas de combustible y energía mecánica en el caso de los motores térmicos, emitiendo a la atmósfera en ambos casos únicamente vapor de agua, lo que implica grandes beneficios medioambientales [12][18]. En el mundo la mayoría de los fabricantes de vehículos tienen programas de I+D+i de celdas de combustible, debido a que, a medio y largo plazo constituyen una de las mejores alternativas para mejorar la eficiencia en los motores de combustión interna [18].

El desarrollo de celdas de electrólisis capaces de producir hidrógeno, que sean cada vez más fiables, compactas y efectivas; así como el estudio de la integración de estas tecnologías renovables y no renovables como el gas natural a vehículos de uso cotidiano, representa los primeros pasos para la transición energética en nuestro parque automotor; no obstante el diseño de las celdas de electrólisis e instalación de sistema de conversión a gas natural vehicular se deben poner a prueba en sistema bi-combustible con el fin de caracterizar el funcionamiento de motores de combustión interna en diferentes condiciones de velocidad mediante mezcla de hidrógeno, gasolina y gas natural vehicular con el fin de evaluar su impacto en la reducción de consumo de combustible y disminución de las emisiones contaminantes.

## 5. ANTECEDENTES

Varias investigaciones han reportado resultados sobre la utilización de hidrógeno en motores de combustión interna bajo la modalidad de combustible dual con el fin de mejorar el rendimiento en consumo de combustible y emisiones contaminantes. Chintala V. et. al. En India alcanzaron mejorar la eficiencia en un 14% en un motor de combustión interna de inyección directa de un solo cilindro (potencia nominal de 7,4 kW a 1500 rpm) con la adición de 20 % de hidrógeno [19]. Yadav et al. Obtuvieron una mejora del 11,6% en la eficiencia térmica de un motor de combustión interna (potencia nominal de 4,4 kW a 1500 rpm) con una adición de 120 g/h de hidrógeno [20]. Madhujit Deb. Lograron una eficiencia térmica del 39,6% en un motor de combustión interna (potencia nominal de 5,2 kW a 1500 rpm) con la adición del 30% de hidrógeno [21]. Asimismo Wu H-Wand Wu Z-Y informó una mejora

significativa en la eficiencia térmica de un motor CI en modo de combustible dual con un 30% de energía de hidrógeno a una carga del 100% [22].

Las mezclas de combustible de gas natural han sido extensamente estudiadas en los motores de encendido por chispa. El gas natural cuenta con disponibilidad doméstica, infraestructura de distribución generalizada, bajo costo y calidades de combustión limpia que se utilizan como combustible para el transporte. Los estudios de uso de este combustible en motores de combustión muestran una mejora en la eficiencia térmica del motor y una reducción de las emisiones contaminantes [23]. Se han logrado reducciones entre un 70- 90 % en monóxido de carbono, 75-95 % en óxidos de nitrógeno y entre un 20 -30% en dióxido de carbono [24]. Shamekhi et al. Reportó la disminución en la eficiencia volumétrica entre un 10 y un 14,2 % y una reducción de par entre un 10,8 y un 14%, asimismo la eficiencia térmica del motor alimentado con gas natural vehicular se incrementó entre un 22 y 33%. Por otra parte, las emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono y dióxido de carbono se redujeron [24].

La aplicación de celdas de hidrógeno para aumentar la eficiencia del combustible en vehículos ha sido una de las aplicaciones comerciales de la tecnología de electrólisis del agua [25]. En Colombia se han realizado análisis en libertad de operación, competidores y posibles clientes para productos comerciales y desarrollos tecnológicos que integren celdas de hidrógeno. Las patentes encontradas están directamente relacionadas con los sistemas generadores de hidrógeno para motores de combustión interna (Ciclo Diésel y Ciclo Otto), conectados al sistema de admisión del motor [26][27].

La mayoría de las patentes solicitadas en Colombia relacionadas con sistemas generadores de hidrogeno se encuentran abandonadas, lo cual permite la comercialización de este tipo de productos en Colombia sin riesgo de infringir la propiedad intelectual de terceros. Existe una gran masa de comercio informal y de empresas en Colombia no constituidas que venden estos productos. Existen en internet muchos blogs y perfiles en redes sociales de sistemas generadores de hidrógeno. Asimismo existe un gran interés en esa tecnología, evidenciada en la cantidad de emprendimientos encontrados y personas con proyecto de constituir empresa [26][28][29].

Esta tecnología ofrece resultados en ahorro de combustible, por esto goza de atención en Colombia, aunque en dichos ahorros de combustible no existe uniformidad ni evidencia experimental por parte de las empresas que publican sus productos, lo cual indica que no hay una cuantificación real del ahorro. Las empresas complementan el portafolio de productos con los sistemas EFIE (Electronic Fuel Injection Enhancers) para aumentar el

ahorro de combustible, así como también servicios de mantenimiento, garantía y recomendaciones de buenas prácticas con el vehículo [26][29].

El semillero de investigación en integración energética (SIIE) de la Universidad ECCI ha trabajado en la adecuación de motor Chevrolet Aveo 1600 cc para su funcionamiento bi-combustible gasolina-hidrógeno y GNV-hidrógeno con el fin de caracterizar su funcionamiento en diferentes condiciones de velocidad y bajos porcentajes de carga.

Los resultados experimentales muestran que la adición de gas hidrógeno en la mezcla aire/combustible en un motor Chevrolet Aveo 1600cc genera una reducción en el consumo de combustible del 36% a bajas revoluciones (800 rpm) y de un 30 % a altas revoluciones (2500rpm) para una operación con mezcla gasolina+HHO a 15 A y sin intervención del sensor de oxígeno cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Se obtuvieron reducciones del 100% en la concentración de hidrocarburos pesados a bajas velocidades (800rpm) para mezclas de gasolina+HHO a 8A- 0mV y altas velocidades (2500rpm) para mezclas de gasolina+HHO a 15A- 0mV cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Se lograron reducciones de 52% en la concentración de dióxido de carbono para bajas velocidades (800rpm) y de 100% para altas velocidades para mezclas de gasolina+HHO a 15 A- 0mV cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar un motor de combustión interna en diferentes condiciones de velocidad mediante mezcla de hidrógeno, gasolina y gas natural vehicular

### **6.2. Objetivos Específicos**

1. Puesta a punto de motor de combustión interna (mantenimientos y correctivos).
2. Puesta a punto de celdas de generación de gas hidrógeno (mantenimientos y correctivos).
3. Puesta a punto de sistema de gas natural vehicular integrado a motor de combustión interna.
4. Realizar montaje experimental integrado por motor, celda de hidrógeno, sistema de gas natural vehicular, escáner automotriz, balanza digital, analizador de gases, pirómetro, rotámetro de gases, tablero de control de celda, sensor de oxígeno y multímetro.
5. Adquisición de datos de consumo de combustible y emisiones contaminantes con las variaciones de condiciones de carga, combustible dual usado (gasolina- hidrógeno y GNV-hidrógeno).
6. Graficas de consumo de combustible vs rpm y emisiones vs rpm.
7. Construcción de informe de resultados experimentales.

## 7. EL MARCO TEÓRICO

Los motores térmicos obtienen la energía del combustible aportado, efectuándose una transformación de su energía química, dada por el calor específico del combustible empleado, en energía calorífica. Esta es aprovechada para incrementar la presión, transformándose por tanto en energía de presión. A partir de esta última, se genera una fuerza resultante, con la que se transforma en energía mecánica, dotando a los componentes móviles del motor de energía cinética. Son, con diferencia, los motores más utilizados en todo tipo de vehículos, tanto terrestres, como marítimos o aéreos [10][16][30].

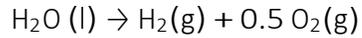
El gas natural como combustible se adapta muy bien a los motores de combustión interna, presentando buena resistencia a la detonación, permite una mezcla homogénea con el aire y mejora la combustión completa, libre de hollín y con menos producción de gases contaminantes (CO, HC, y CO<sub>2</sub>). El gas natural tiene una temperatura de encendido de aproximadamente 650 °C un 50% mayor a la temperatura de inflamación de la gasolina. Presenta una velocidad de llama de 2,2 pies por segundo un 21% más lenta que la velocidad de llama de la gasolina, una relación estequiometría de aire/combustible de 16,4:1 y un índice de octano entre 115-130 y una pérdida de potencia entre 10 y el 15% [7][30].

Existen dos tecnologías usadas en las instalaciones de GNV, tecnología convencional de lazo abierto y lazo cerrado y tecnología de quinta generación, la tecnología de lazo abierto se aplica a vehículos con motores alimentados a carburador o con control electrónico de combustible sin sensor de oxígeno. La dosificación del gas se realiza a través de una válvula de potencia que es graduada por parte del técnico que realiza la instalación. La tecnología de lazo cerrado es usada en motores alimentados por control electrónico de combustible que tiene sensor de oxígeno. La dosificación del gas se realiza a través de un motor paso a paso que está controlado electrónicamente por un PLC. La tecnología de quinta generación se aplica a vehículos con motores alimentados por inyección electrónica, donde se instala un equipo que entrega el combustible en cada cilindro por un inyector independiente, simulando la operación que se hace al utilizar gasolina [7][31]

En la Figura 1 se muestra una celda de electrólisis alcalina típica, el principio de funcionamiento es el paso de una corriente eléctrica continua entre dos electrodos inmersos en un electrólito. El hidrógeno se forma en el cátodo y el oxígeno en el ánodo (terminal positivo). La producción de hidrógeno es directamente proporcional a la corriente que pasa a través de los electrodos [32][33][34].

Los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, tener buena conductividad eléctrica, exhibir buenas propiedades catalíticas, mostrar integridad estructural adecuada y no

reaccionar con el electrolito [33]. La reacción química global de la electrólisis del agua se puede escribir como:



Ecuación (1)

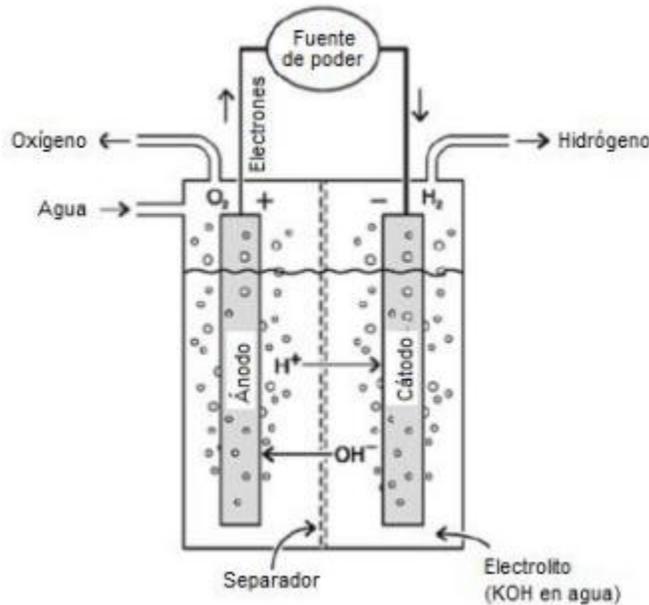


Figura 1 Celda de electrólisis alcalina [35]

En este trabajo experimental, las pruebas se ejecutarán con el fin de determinar el rendimiento en consumo de combustible y porcentaje de emisiones generadas en un motor de combustión interna de inyección electrónica operada con gasolina- hidrógeno y GNV- hidrógeno. Los detalles del motor, propiedades de los combustibles, celda de generación de hidrógeno, tanque de almacenamiento de combustible y unidad de control se discuten a continuación.

Un motor Chevrolet Aveo 1600cc es usado para la prueba experimental, las especificaciones del motor se muestran en la Tabla 1. Asimismo, las propiedades de la gasolina, gas natural y el gas hidrógeno son mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 1 Especificaciones del motor [36]**

Marca	Chevrolet Aveo
Tipo	4CIL DOHC 16V
Torque kg-m (Nm) @rpm	14,7 (144.1) @ 3600
Potencia (HP @rpm)	103 @ 6000
Sistema de encendido	Eléctrico
Bomba de gasolina	Eléctrica
Desplazamiento (cc)	1,598
Diámetro x carrera (mm)	79 x 81,5
Numero de cilindros	4 en línea
Numero de válvulas	16
Posición	Transversal
Relación de compresión	9,5:1
Relación de giro	4,89/5,12

**Tabla 2 Propiedades del combustible [30][37]**

Propiedad	Gasolina	Gas Natural	Hidrógeno
Estructura química	C8H18	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	43	47	120
Poder calorífico superior (MJ/kg)	47	52	142
Número de octanos	84-93	>120	130
Punto de inflamabilidad (°C)	-43		-
Temperatura de ignición (°C)	257	579	566 – 582
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	803	465	0,082
Límites de inflamabilidad del aire (% vol.)	1,2 – 7,1	-	4 - 75

En la tabla 2 se muestra la celda de generación de hidrógeno a usar en la ejecución experimental. La celda está fabricada en láminas de acero inoxidable 304L, placas de acrílico y empaques de neopreno que unidos con tornillos y tuercas de ¼" garantizan la hermeticidad necesaria para la generación de la solución electrolítica. La celda tiene acoplados dos tanques contenedores que funcionan como burbujeador primario de la solución electrolítica generada, conectados por medio de racores en nilón de rosca 3/8", espigas de pescado de 1/4" y manguera reforzada de PVC a un tercer tanque en acrílico que sirve como burbujeador secundario y filtro de gas. Conectado por medio de mangueras reforzadas de PVC se instala

una trampa de agua y dos arrestadores de llamas en tubo de acero para proteger el sistema del agua de posibles explosiones generadas por el gas combustible que se conduce al sistema de admisión del motor. En la Figura 3 se muestra el tanque muestra el tanque de combustible usado para almacenar la gasolina, fabricado en lámina de acrílico de 20 x 25 x 1 cm con un volumen de 12,5 litros.

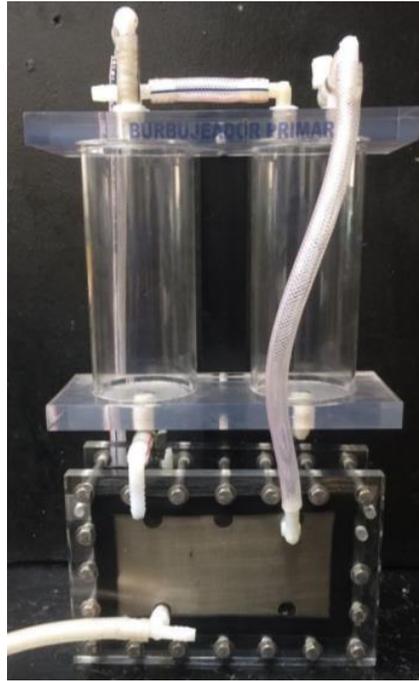


Figura 2 Celda de electrolisis alcalina

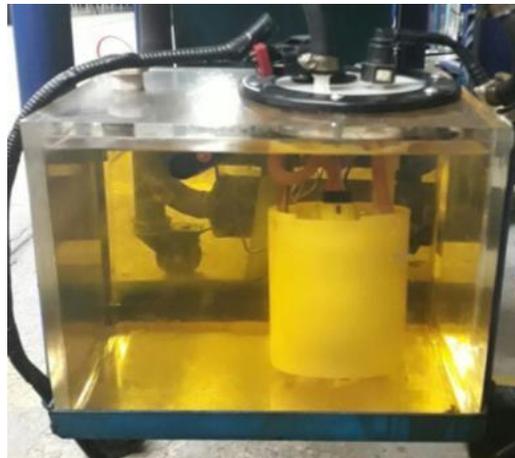


Figura 3 Depósito de combustible

En la Figura 4 se muestra el esquema del montaje experimental a usar. El gas hidrógeno es generado por medio del proceso de electrólisis en una celda alcalina. El gas es contabilizado por un caudalímetro y es mezclado con aire fresco antes de ingresar a la cámara de combustión. La prueba se lleva a cabo con el fin de evaluar el rendimiento del motor operando en una condición de carga constante, velocidad variable (800 - 3500 rpm), funcionando solo con gasolina, con la mezcla dual gasolina- hidrógeno y gasolina-gas natural. Las lecturas de consumo de combustible se registran cada minuto en una balanza digital y los gases de escape son procesados por un analizador de gases capaz de identificar y determinar el porcentaje en volumen (% vol.) de hidrocarburos pesados (HC), monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $NO_x$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). Un escáner automotriz es utilizado para registrar rpm, temperatura del cárter del motor, señal sensor de oxígeno, relación aire combustible temperatura de aire de ingreso, carga de motor, sensor MAP, barómetro y corriente entregada por alternador.

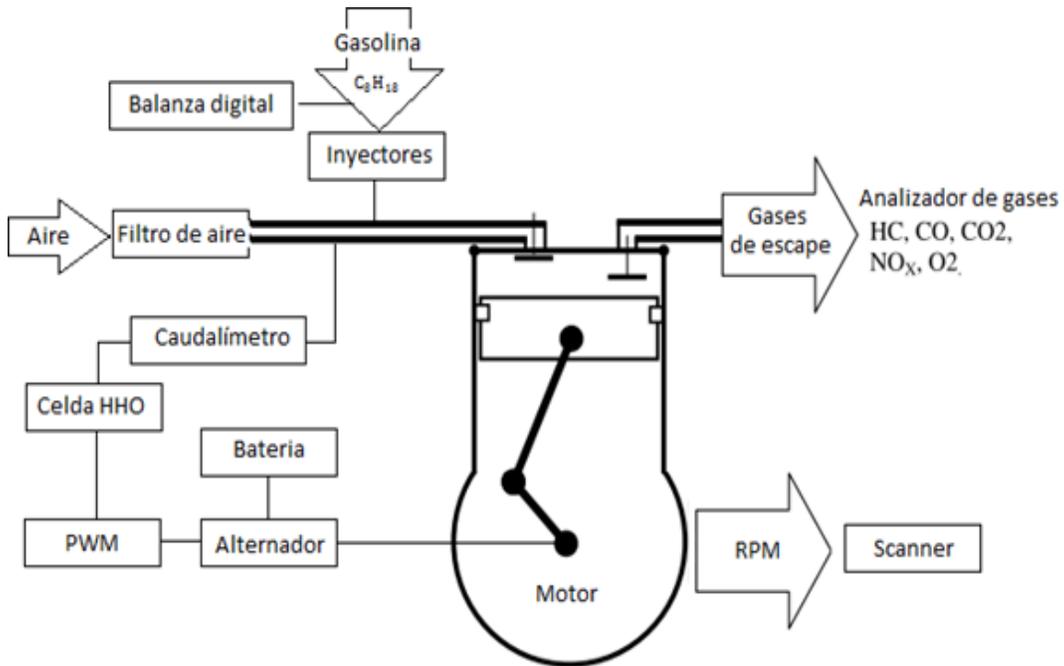


Figura 4 Esquema ejecución experimental

## 8. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico para este desarrollo de este proyecto fue experimental, puesto que se realizó la puesta a punto del motor de combustión interna, se ajuntan las características y parámetros del equipo a las condiciones de fábrica, con el fin de asegurar que el proceso sea confiable y las pruebas realizadas sean verídicas.

### 8.1. FASE DE DESARROLLO.

Se realiza revisión bibliográfica del proceso de combustión, electrolisis de agua, generación de gas hidrógeno, diseño, fabricación y ensamble de celdas de combustible, asimismo la revisión de manuales de operación de dispositivos auxiliares que integran la ejecución experimental.

Puesta a punto de motor de combustión interna: Se ajustaran las características y parámetros del equipo a la condiciones de fábrica, con el fin de asegurar que el proceso sea confiable para la obtención de datos, se hará la comprobación del funcionamiento de cada uno de los sistemas y subsistemas, hasta garantizar la repetibilidad en los resultados de cada una de las variables del proceso (rpm, temperatura del cárter del motor, señal sensor de oxígeno, relación aire combustible temperatura de aire de ingreso, carga de motor, sensor MAP, barómetro y corriente entregada por alternador)

Puesta a punto de celda de generación de hidrógeno: Se hará el mantenimiento de los componentes que integran la celda de generación, cambio de agua desmineralizada, cambio de empaques y tornillos. Así mismo se construirá un procedimiento detallado del mantenimiento para cada uno de los componentes que integran la celda.

Puesta a punto de motor de combustión interna Aveo family modelo 2007: Se realiza la recepción y la inspección visual del motor, verificando si los componentes de GNV se pueden instalar correctamente, se ejecutarán pruebas diagnósticas y de funcionamiento del motor, verificando correcta operación de sistema eléctrico, sistema de encendido, control de marcha mínima y crucero, estado mecánico del motor con pruebas en vacío, pruebas de compresión y fugas en cilindros. Asimismo, se hará en análisis de gases revisando las posibles causas de fallas y la revisión de sistemas de refrigeración y lubricación

Realizar montaje experimental: se organizará el montaje con el fin de recolectar los datos de las siguientes variables: rpm motor, temperatura del carter del motor, relación aire combustible, corriente suministrada a celda de generación, medición de cantidad de

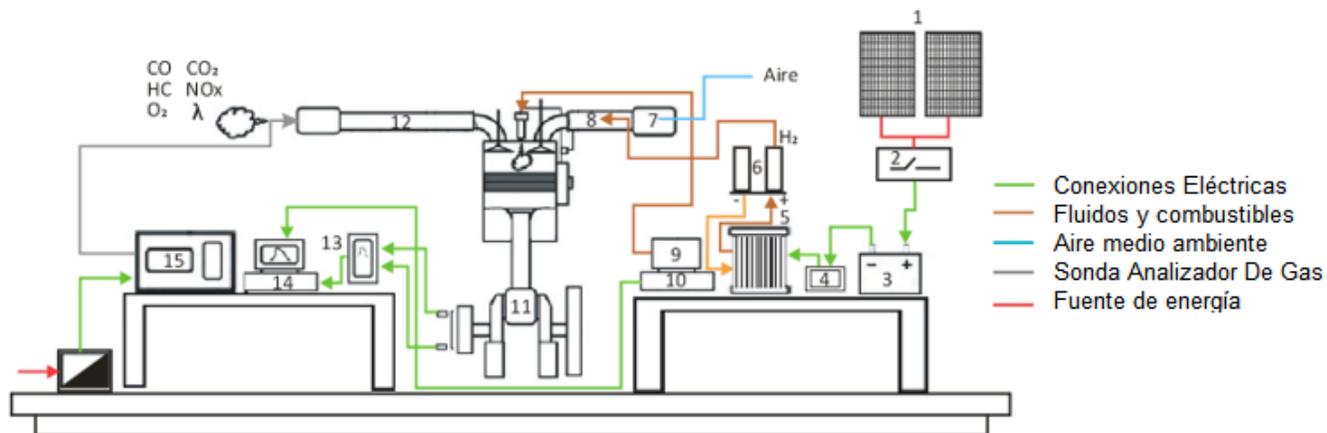
hidrógeno generado, consumo de combustible en gramos y emisiones generadas.

Adquisición de datos: Se construirá tabla estándar de adquisición de datos que permitan almacenar las variables principales del proceso. Así mismo se definirán las condiciones de carga, cantidad de hidrógeno alimentado al motor y la intervención del sensor de oxígeno

Grafica e interpretación de datos: se calcularan los promedios de rpm de la ejecución experimental durante pruebas de 15 – 20 minutos para cada condición de carga, cantidad de hidrógeno alimentado, porcentaje de intervención del sensor de oxígeno y emisiones promedios generadas durante la ejecución experimental los datos calculados permitirán graficar curvas de consumo en gr Vs diferentes condiciones de RPM y emisiones generadas Vs diferentes condiciones de rpm, que nos permitan cuantificar los porcentajes máximos alcanzados en reducción de consumo de combustible y emisiones contaminantes.



Figura 5 Montaje de motor de combustión interna



- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| 1 Panel Solar Policristalino 12V - 130V | 9 Tanque De Gasolina             |
| 2 Inversor                              | 10 Balanza                       |
| 3 Banco De Batería                      | 11 Motor AVEO 1.6 Lt Modelo 2007 |
| 4 PWM                                   | 12 Exhosto                       |
| 5 Celda De Hidrógeno                    | 13 Scanner Automotriz            |
| 6 Tanque Burbujeador                    | 14 PC                            |
| 7 Filtro De Aire                        | 15 Analizador De Gases           |
| 8 Línea de Aire                         | 16 Fuente De Energía 120V        |

Figura 6 Esquema montaje motor de combustión interna.

Tabla 3 Ficha técnica de componentes figura 6.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	FICHA
1	Panel Solar Policristalino 12V - 130V	Voltaje generado: 12 – 120 V
2	Inversor	Marca: Nova Referencia: NV-12V030 Voltaje: 12 V Corriente: 30 Amp
3	Banco De Batería	Marca: Mtek Voltaje: 12 V
4	PWM	Voltaje: 12 V Corriente: 0- 25 Amp
5	Celda de electrolisis alcalina	16 litros de HHO
6	Tanque Burbujeador	Material: Acrílico Se compone de dos cilindros de 8 cm de diámetro externo y una altura de 17 cm
7	Filtro de Aire	P.N.: 96536696 / 96536697

		Ref: Motor Aveo Family Mod 2007
8	Línea de Aire	Tapa superior del filtro de aire perforado para la admisión de HHO
9	Tanque De Gasolina	Material: Acrílico de 1 cm de espesor Capacidad: 9,151 lt Alto: 22 cm Ancho: 20,6 cm Largo: 26,6 cm Espesor de placa: 1 cm
10	Balanza	Marca: Lexus Modelo: Fenix-Maxi Apreciación: 5 gr Puerto: RS 232 Fuente de energía: Cargador a conexión de 120V
11	Motor AVEO 1.6 Lt Modelo 2007	Cilindrada: 1600cc Modelo: 2007 Numero pistones: 4 Distribución: Línea 16 válvulas Fabricante: Chevrolet
12	Exhosto	Material: Acero
13	Scanner Automotriz	Marca: Hanatech Modelo: Ultrascan P1 Puerto: HBDII para conexión ECU USB para conexión PC
14	PC	Procesador: Intel Celeron CPU B820 1.70GHz Memoria RAM 4GB Programas requeridos: HostPro.exe AccessPort.exe
15	Analizador De Gases	Marca: Hanatech Modelo: IM 2400 – Ultra 4/5 Gas Analyzer Fuente de energía: 120 V
16	Fuente de Energía 120V	Fuente de energía proveniente de la Red de Eléctrica Domiciliaria.

## 8.2. INSTRUMENTACIÓN DEL MOTOR

Para la experimentación es necesario colocar en marcha en motor, y lograr la instrumentación de este con el fin de adquirir datos, los cuales serán evaluados posteriormente.

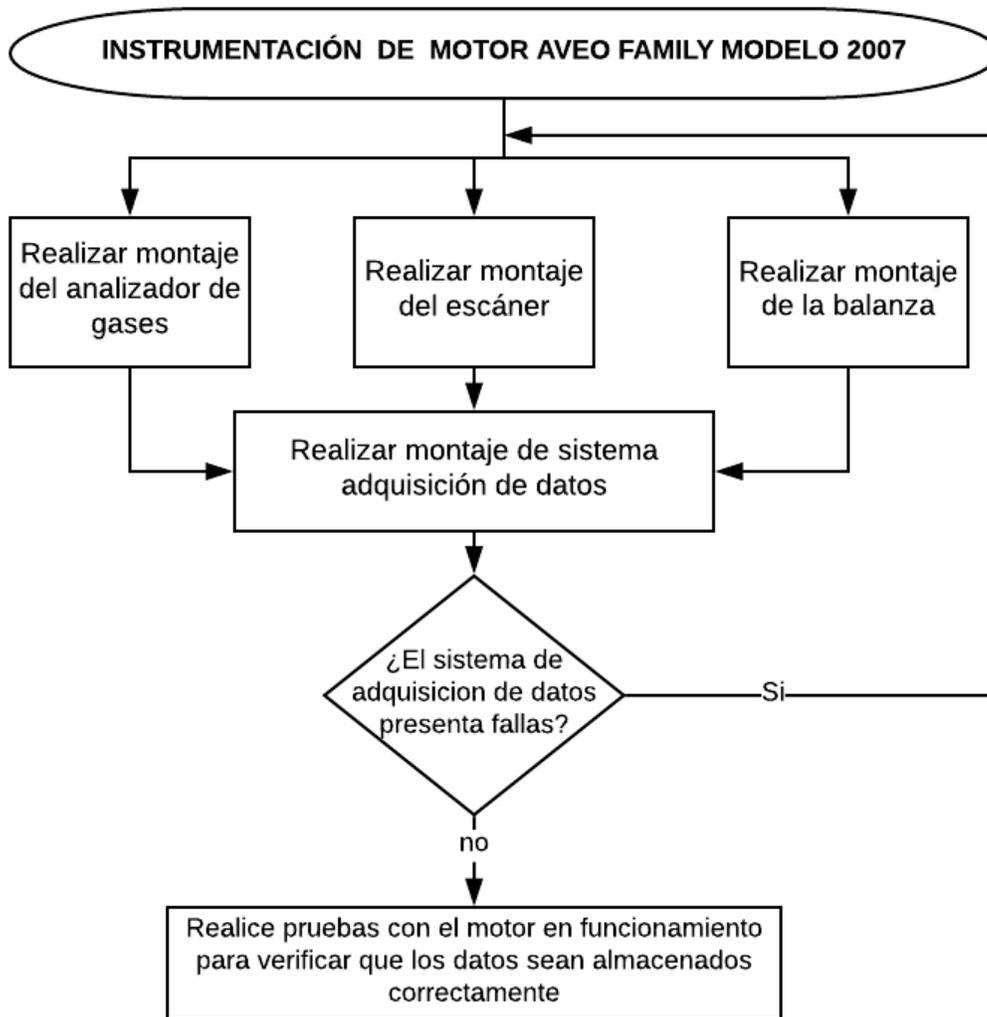


Figura 7 Flujograma para realizar la instrumentación del motor

El montaje anteriormente mencionado se dividirá en sub montajes para dar mayor entendimiento al lector:

- Montaje del escáner
- Montaje de la balanza
- Montaje del analizador de gases
- Montaje de sistema adquisición de datos
- Alistamiento de herramientas anexas para la experimentación

### **8.3. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR MONTAJE.**

A continuación, se ofrece una breve explicación del procedimiento para realizar cada uno de los montajes, así como el objetivo de su implementación.

#### **8.3.1. MONTAJE DEL ESCÁNER**

El escáner utilizado para adquirir los datos es un Hanatech Ultrascan P1 con puerto de comunicación HBDII, el escáner es un factor importante en la instrumentación del motor dado que este permite recolectar datos de variables tan importante como las revoluciones por minuto del motor, temperatura del refrigerante, presión atmosférica, presión en la válvula de aceleración, tiempo de funcionamiento del motor entre otras y todo esto en tiempo real; para realizar la conexión del escáner se realizó la siguiente secuencia

**Conexión de HBDII:** se realiza la conexión del cable de 15 pines de conexión al puerto HBDII en cual permite la comunicación entre el escáner y el ECU del motor, el otro extremo del cable es conectado en el lateral derecho del escáner; es necesario asegurar la conexión de los puertos de comunicación con los tornillos de aseguramiento.

**Conexión de puerto USB:** este puerto se encuentra ubicado en la parte inferior del escáner, se conecta el cable que posteriormente será conectado al computador para adquirir los datos producidos por el escáner Hanatech.

**Conexión de fuente de poder:** Este paso es opcional pues los puertos de 15 pines mencionados en el numeral a) del montaje del escáner posee un pin con carga negativa y otro con carga positivo lo que entrega al escáner la energía suficiente para que este sea encendido. No obstante, se puede realizar la conexión de la fuente de poder del escáner el cual cuenta con una terminal positiva y otra negativa loas cuales deben ser conectadas a los polos correspondiente directamente a la batería utilizada por el motor la cual debe ser de 12 V el otro extremo de la fuente de poder es de conexión circular y se conectara en la parte inferior del escáner al lado derecho de la conexión USB.

**Encendido del escáner:** Solo queda poner en marcha el escáner oprimiendo el botón de encendido “Power”. *Para verificar el paso a paso para comunicarse con el ECU del motor favor verificar anexos, (INSTRUCTIVO SCANNER)*

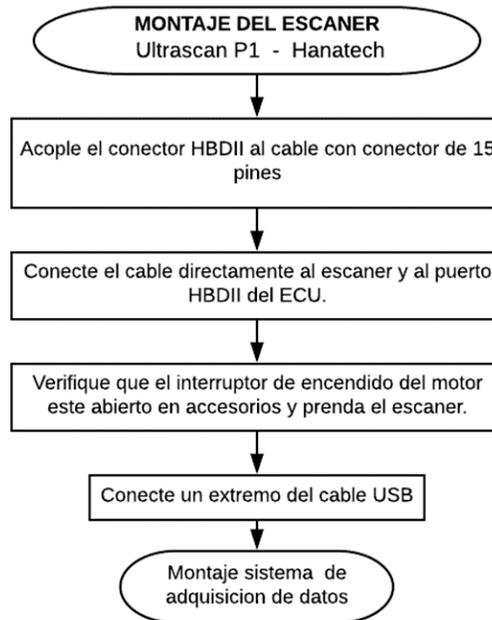


Figura 8 Flujograma para el montaje del escáner automatizado

### 8.3.2. MONTAJE DE LA BALANZA

La balanza utilizada para recolectar los valores de la pérdida de masa en la prueba de 6 minutos es una balanza marca LEXUS modelo FENIX-MAXI con apreciación de 5 gr. Este valor es importante pues dado que permite realizar el cálculo de consumo de combustible utilizado por el motor, este dispositivo será utilizado solo en las pruebas de gasolina.

Para realizar el montaje de la balanza lo primero que se hace es realizar la nivelación de esta para que no quede inestable y se garantice que la medición sea adecuada, posterior a esto se conecta el puerto de comunicación **RS232** de 9 pines de comunicación el cual se encuentra en la parte inferior de la balanza al lado izquierdo de esta, el cable de 9 pines posee una conversión a conexión USB es cual será conectado posteriormente al computador; también es necesario conectar la fuente de poder de la balanza a una toma eléctrica de 110V, la conexión a la balanza de la fuente de poder se encuentra en la parte inferior derecha de la balanza.

Ya realizada la conexión de la balanza se realiza el encendido de esta oprimiendo el botón de encendido y se debe asegurar que esta esté en ceros ( 0 ), luego de esto se pone encima de

la balanza el tanque de combustible del motor.

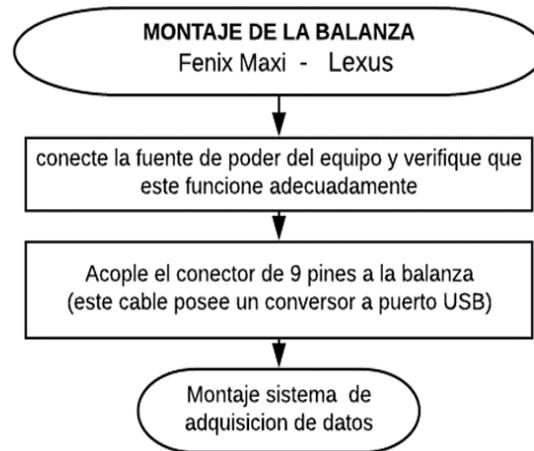


Figura 9 Flujograma para el montaje la balanza

### 8.3.3. MONTAJE DEL ANALIZADOR DE GASES

El analizador de gases utilizado para la realización de este montaje es un ultra 4/5 gas analyzer IM2400 marca Hanatech, el cual posee la tarjeta de comunicación averiada por lo que no se pueden extraer datos de forma digital, por ende es necesario la utilización de fotos para llevar tomar los datos referentes a la emisión de gases emitidos por tubo de escape del motor en pruebas.

Para poner en funcionamiento el analizador de gases es necesario conectarlo a una fuente de corriente eléctrica de 110 V, conectar la sonda la cual será introducida al escape del motor y procurar que el filtro este en buenas condiciones para su uso.

Cada una de las pruebas del motor se realizaron durante 6 minutos y por cada prueba se realizó la toma de dos muestras de los gases emitidos por el motor al medio ambiente, tales muestras fueron tomadas durante un tiempo de 60 segundos en los minutos 2 y 5 de la prueba.

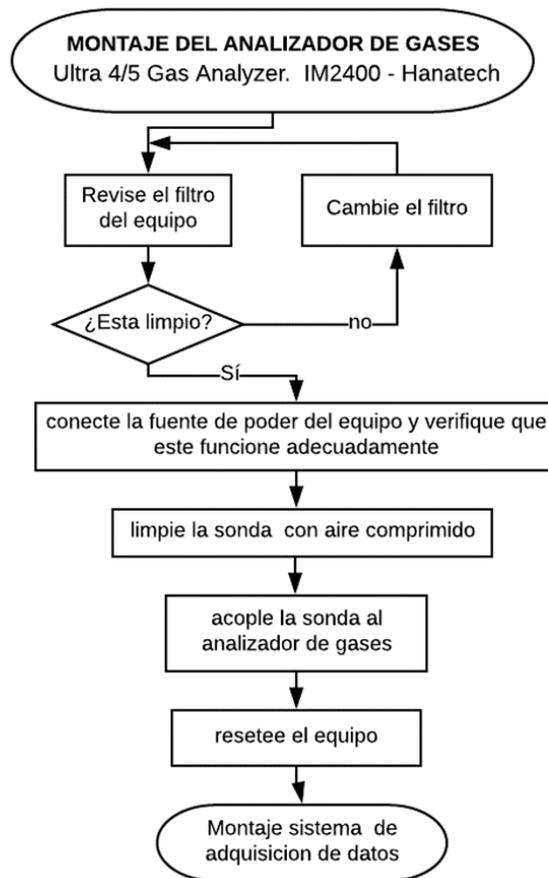


Figura 10 Flujograma para el montaje del analizador de gases

#### 8.3.4. MONTAJE DE SISTEMA ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos es netamente digital y recolectara los datos provenientes del escáner y de la balanza digital.

Para realizar ese montaje es necesario contar con un computador que cuente con los programas de comunicación HostPro.exe, programa que comunicara con el escáner Hanatech y además con el programa de comunicación con la balanza el cual es el AccesPort.exe.

Para prestar comunicación con el escáner y la balanza es necesario conectar los puertos USB utilizados por ambos dispositivos a los puertos USB del computador y realizar la configuración respectiva tanto del computador como de los programas para que estos últimos funcionen adecuadamente. *Para verificar el paso a paso para comunicarse con la balanza favor verificar anexos. (INSTRUCTIVO BALANZA).*

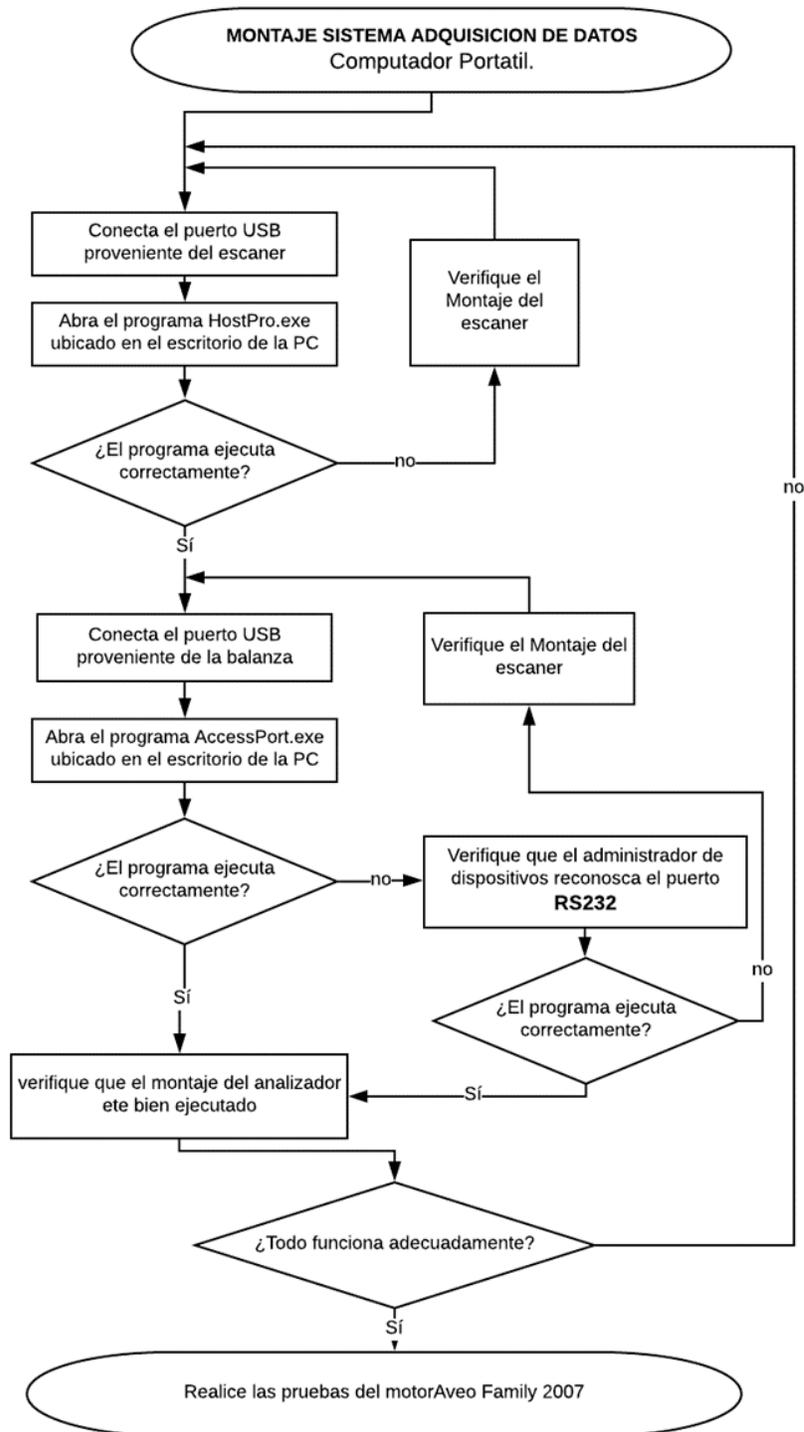


Figura 11 Flujograma para el montaje del Sistema de adquisición de datos

### **8.3.5. ALISTAMIENTO DE HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN**

Otras herramientas necesarias para la experimentación y adquisición de datos es la utilización de:

Un pirómetro con el cual se realizaron medidas al por minuto al múltiple de escape en el área del empaque que comunica con el tubo de escape.

Una llave Allen número 2,5 mm con el cual se manipulará la apertura de la válvula de aceleración con el fin de aumentar o disminuir las RPM de motor.

Utilización de guantes de carnaza para proteger las manos al momento de introducir y extraer la sonda del analizador de gases.

### **8.3.6. DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL**

Lo primero que se debe realizar antes de comenzar toda prueba es poner el banco del prueba en un sitio seguro en el cual sea posible la utilización del extractor de gases para así reducir el riesgo de inhalar gases tóxicos y nocivos para la salud los cuales son emitidos por el escape del motor, una vez realizado este procedimiento se le puede dar arranque al motor para que al momento de realizar las pruebas el motor se encuentre en la temperatura de trabajo, la cual corresponde a 92°C en el ECT Sensor.(Sensor de temperatura del refrigerante del motor); paralelo a esto se debe realizar el procedimiento de montaje del sistema de instrumentación del motor descrito en la Figura 7.

Una vez realizado el procedimiento se deben realizar pruebas para comprobar que el sistema de adquisición de datos esté funcionando adecuadamente; si no se evidencia ningún problema ya se está listo para realizar la prueba y así adquirir datos, es importante verificar que el motor se encuentre en la temperatura de trabajo. Para el desarrollo de la prueba experimental es necesario tener en cuenta las condiciones con las cuales se va realizar la prueba pues las condiciones de cada prueba son diferentes dado que siempre varía el combustible, el amperaje suministrado a la celda de HHO o la velocidad del motor (rpm). Una vez controladas las condiciones se debe poner a trabajar el motor durante dos (2) minutos con las condiciones de la prueba a realizar para que todas las variables tiendan a estabilizarse; luego de esos dos (2) minutos se pone en marcha el cronometro y se procede a realizar lo descrito en la

Tabla 4.

Tabla 4 Descripción actividades a realizar durante tiempo de experimentación

MINUTO	DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTO
0:00	Inicio de cronometro, puesta en marcha programas de balanza y escáner.
1:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape, se resetea el analizador de gases y se limpia sonda.
1:59	Se introduce la sonda del analizador de gases al escape del motor.
2:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape se pone en marcha el analizador de gases.
3:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape y se retira la sonda del escape.
4:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape, se resetea el analizador de gases y se limpia sonda.
4:59	Se introduce la sonda del analizador de gases al escape del motor.
5:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape se pone en marcha el analizador de gases.
6:00	Se toma dato de la temperatura del múltiple de escape, y se retira la sonda del escape y se guardan los datos adquiridos por los programas de la balanza y del escáner.

Al finalizar la prueba se guardan los datos en la carpeta adecuada estipulando las características de la prueba para evitar posibles confusiones a futuro, las imágenes de las dos tomas de suministradas por el analizador de gases son igualmente almacenadas con plena identificación para su posterior digitalización.

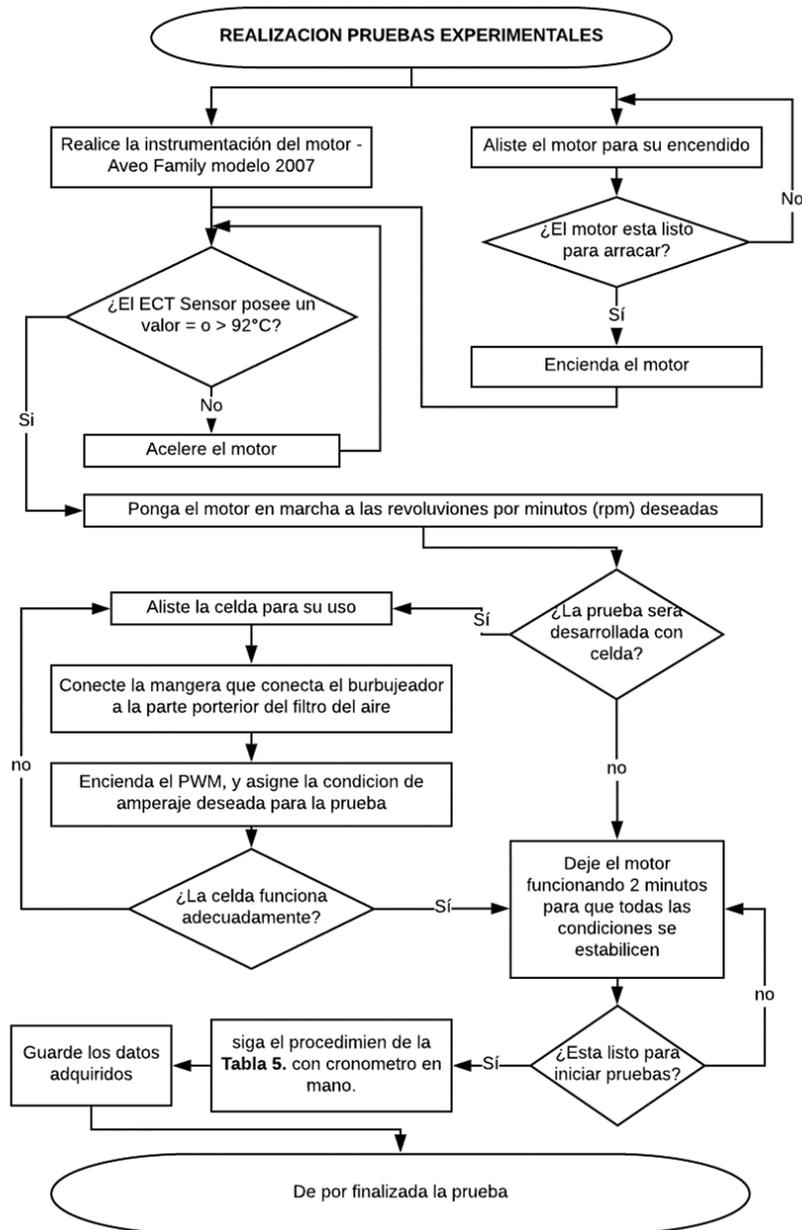


Figura 12 Flujograma del proceso de realización de la prueba

Las pruebas realizadas se hicieron a diferentes condiciones tanto de la celda de HHO, como de revoluciones por minuto y utilizando como combustible gasolina y aparte el gas natural vehicular.

Tabla 5 Tabla de pruebas realizadas a lo largo de la experimentación

CONDICIONES		COMBUSTIBLE	
CELDA	RPM	GASOLINA	GNV
Sin Celda de HHO	1000	▪	▪
	1500	▪	
	2000	▪	
	2500	▪	▪
	3000	▪	
Celda de HHO a 5 amp	1000	▪	▪
	1500	▪	
	2000	▪	
	2500	▪	▪
	3000	▪	
Celda de HHO a 10 amp	1000	▪	▪
	1500	▪	
	2000	▪	
	2500	▪	▪
	3000	▪	
Celda de HHO a 15 amp	1000	▪	▪
	1500	▪	
	2000	▪	
	2500	▪	▪
	3000	▪	
Celda de HHO a max amp	1000	▪	▪
	1500	▪	
	2000	▪	
	2500	▪	▪
	3000	▪	

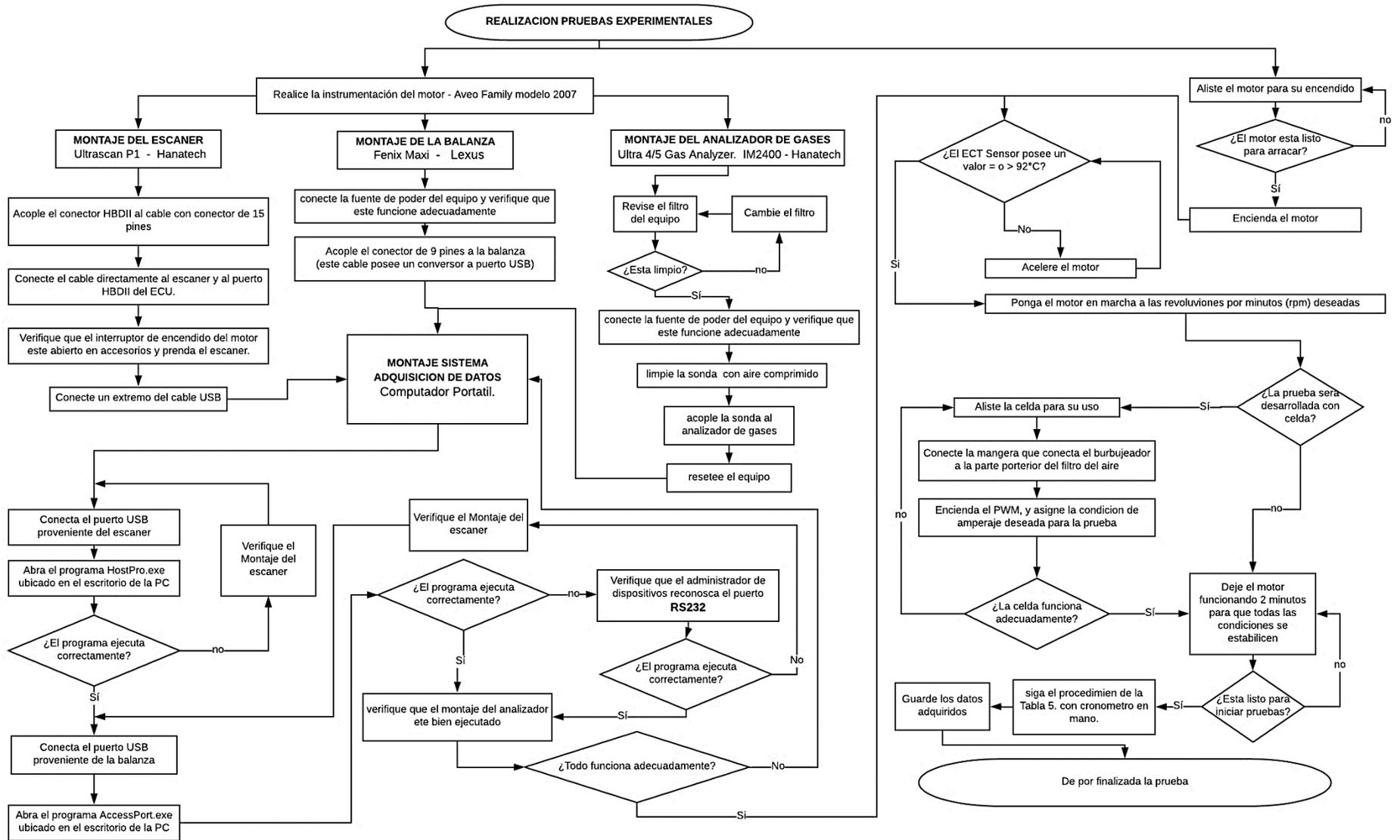


Figura 13 Relación pruebas experimentales

## 9. RECOLECCIÓN DE DATOS

En las pruebas realizadas se mide el consumo de gasolina, hidrógeno y gas natural, realizando tomas con amperajes distintos, en el cual se realiza un análisis de gases con el motor funcionando en las diferentes condiciones nombradas anteriormente.

En las Tablas mostradas a continuación se evidencia el consumo de las siguientes pruebas 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm con distintos amperajes, 5 amp, 10 amp y 15 amp y el amperaje máximo que nos dé el PWM con respecto al electrolito que se está utilizando.

Se evidencia el consumo de gasolina, con celda de electrolisis 40% NaOH realizando cada prueba durante 6 minutos y dando un tiempo de estabilización al motor y al PWM en intervalos de dos (2) minutos y dando como condición inicial una temperatura el ECT de 92°C.

**Tabla 6 Consumo 1000 rpm 5 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

Tabla consumo 5 amp - celda HHO- NaOH 40 %				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	11445	0,0	-
60	1,0	11430	15,0	15,0
120	2,0	11415	30,0	15,0
180	3,0	11405	40,0	10,0
240	4,0	11395	50,0	10,0
300	5,0	11380	65,0	15,0
360	6,0	11365	80,0	15,0

**Tabla 7 Consumo 1000 rpm 10 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

Tabla consumo 10 amp 1000 rpm - celda HHO- NaOH 40 %				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	11315	0,0	-
60	1,0	11300	15,0	15,0
120	2,0	11285	30,0	15,0
180	3,0	11275	40,0	10,0
240	4,0	11260	55,0	15,0
300	5,0	11250	65,0	10,0
360	6,0	11240	75,0	10,0

**Tabla 8 Consumo 1000 rpm 15 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 15 amp 1000 rpm - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	11185	0,0	-
60	1,0	11170	15,0	15,0
120	2,0	11155	30,0	15,0
180	3,0	11145	40,0	10,0
240	4,0	11135	50,0	10,0
300	5,0	11120	65,0	15,0
360	6,0	11110	75,0	10,0

**Tabla 9 Consumo 1000 rpm amp max gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 1000 rpm amp max - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	7405	0,0	-
60	1,0	7390	15,0	15,0
120	2,0	7375	30,0	15,0
180	3,0	7360	45,0	15,0
240	4,0	7345	60,0	15,0
300	5,0	7330	75,0	15,0
360	6,0	7320	85,0	10,0

**Tabla 10 Consumo 1500 rpm 5 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 1500 rpm 5 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	10880	0,0	-
60	1,0	10865	15,0	15,0
120	2,0	10850	30,0	15,0
180	3,0	10830	50,0	20,0
240	4,0	10815	65,0	15,0
300	5,0	10795	85,0	20,0
360	6,0	10780	100,0	15,0

**Tabla 11 Consumo 1500 rpm 10 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 1500 rpm 10 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	10670	0,0	-
60	1,0	10655	15,0	15,0
120	2,0	10635	35,0	20,0
180	3,0	10625	45,0	10,0
240	4,0	10605	65,0	20,0
300	5,0	10585	85,0	20,0
360	6,0	10570	100,0	15,0

**Tabla 12 Consumo 1500 rpm 15 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 1500 rpm 15 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	10505	0,0	-
60	1,0	10490	15,0	15,0
120	2,0	10470	35,0	20,0
180	3,0	10455	50,0	15,0
240	4,0	10435	70,0	20,0
300	5,0	10420	85,0	15,0
360	6,0	10400	105,0	20,0

**Tabla 13 Consumo 1500 rpm amp max gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 1500 rpm amp max - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	5775	0,0	-
60	1,0	5755	20,0	20,0
120	2,0	5730	45,0	25,0
180	3,0	5715	60,0	15,0
240	4,0	5695	80,0	20,0
300	5,0	5670	105,0	25,0
360	6,0	5650	125,0	20,0

**Tabla 14 Consumo 2000 rpm 5 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2000 rpm 5 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	10305	0,0	-
60	1,0	10285	20,0	20,0
120	2,0	10270	35,0	15,0
180	3,0	10250	55,0	20,0
240	4,0	10225	80,0	25,0
300	5,0	10200	105,0	25,0
360	6,0	10175	130,0	25,0

**Tabla 15 Consumo 2000 rpm 10 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2000 rpm 10 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	10075	0,0	-
60	1,0	10050	25,0	25,0
120	2,0	10025	50,0	25,0
180	3,0	10000	75,0	25,0
240	4,0	9975	100,0	25,0
300	5,0	9955	120,0	20,0
360	6,0	9930	145,0	25,0

**Tabla 16 Consumo 2000 rpm 15 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2000 rpm 15 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	9545	0,0	-
60	1,0	9520	25,0	25,0
120	2,0	9500	45,0	20,0
180	3,0	9470	75,0	30,0
240	4,0	9445	100,0	25,0
300	5,0	9420	125,0	25,0
360	6,0	9395	150,0	25,0

**Tabla 17 Consumo 2000 rpm amp max gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2000 rpm amp max - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	6000	0,0	-
60	1,0	5970	30,0	30,0
120	2,0	5945	55,0	25,0
180	3,0	5915	85,0	30,0
240	4,0	5890	110,0	25,0
300	5,0	5865	135,0	25,0
360	6,0	5840	160,0	25,0

**Tabla 18 Consumo 2500 rpm 5 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2500 rpm 5 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	9275	0,0	-
60	1,0	9245	30,0	30,0
120	2,0	9215	60,0	30,0
180	3,0	9185	90,0	30,0
240	4,0	9150	125,0	35,0
300	5,0	9120	155,0	30,0
360	6,0	9085	190,0	35,0

**Tabla 19 Consumo 2500 rpm 10 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2500 rpm 10 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	8980	0,0	-
60	1,0	8950	30,0	30,0
120	2,0	8920	60,0	30,0
180	3,0	8890	90,0	30,0
240	4,0	8860	120,0	30,0
300	5,0	8830	150,0	30,0
360	6,0	8800	180,0	30,0

**Tabla 20 Consumo 2500 rpm 15 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2500 rpm 15 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	8710	0,0	-
60	1,0	8680	30,0	30,0
120	2,0	8650	60,0	30,0
180	3,0	8620	90,0	30,0
240	4,0	8590	120,0	30,0
300	5,0	8555	155,0	35,0
360	6,0	8530	180,0	25,0

**Tabla 21 Consumo 2500 rpm amp max gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 2500 rpm amp max - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	6740	0,0	-
60	1,0	6705	35,0	35,0
120	2,0	6670	70,0	35,0
180	3,0	6635	105,0	35,0
240	4,0	6600	140,0	35,0
300	5,0	6565	175,0	35,0
360	6,0	6530	210,0	35,0

**Tabla 22 Consumo 3000 rpm 5 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 3000 rpm 5 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	8370	0,0	-
60	1,0	8330	40,0	40,0
120	2,0	8285	85,0	45,0
180	3,0	8255	115,0	30,0
240	4,0	8215	155,0	40,0
300	5,0	8170	200,0	45,0
360	6,0	8135	235,0	35,0

**Tabla 23 Consumo 3000 rpm 10 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 3000 rpm 10 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	7970	0,0	-
60	1,0	7930	40,0	40,0
120	2,0	7890	80,0	40,0
180	3,0	7850	120,0	40,0
240	4,0	7810	160,0	40,0
300	5,0	7765	205,0	45,0
360	6,0	7725	245,0	40,0

**Tabla 24 Consumo 3000 rpm 15 amp gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 3000 rpm 15 amp - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	7625	0,0	-
60	1,0	7585	40,0	40,0
120	2,0	7540	85,0	45,0
180	3,0	7500	125,0	40,0
240	4,0	7460	165,0	40,0
300	5,0	7415	210,0	45,0
360	6,0	7375	250,0	40,0

**Tabla 25 Consumo 3000 rpm amp max gasolina – celda HHO a NaOH 40%**

<b>Tabla consumo 3000 rpm amp max - celda HHO- NaOH 40 %</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	6430	0,0	-
60	1,0	6390	40,0	40,0
120	2,0	6350	80,0	40,0
180	3,0	6305	125,0	45,0
240	4,0	6265	165,0	40,0
300	5,0	6225	205,0	40,0
360	6,0	6180	250,0	45,0

En las siguientes Tablas se evidencia el consumo de las siguientes pruebas 1000 RPM,1500 RPM, 2000 RPM, 2500 RPM, 3000 RPM con gasolina, realizando cada prueba durante 6 minutos y dando un tiempo de estabilización al motor en un intervalo de 2 minutos y dando como condición inicial a este una temperatura el ECT de 92°C.

**Tabla 26 Consumo 1000 RPM Gasolina**

<b>TABLA CONSUMO 1000 RPM - GASOLINA</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	11220	0,0	-
60	1,0	11210	10,0	10,0
120	2,0	11200	20,0	10,0
180	3,0	11190	30,0	10,0
240	4,0	11175	45,0	15,0
300	5,0	11160	60,0	15,0
360	6,0	11150	70,0	10,0

**Tabla 27 Consumo 1500 RPM Gasolina**

<b>Tabla consumo 1500 rpm - gasolina</b>				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	9455	0,0	-
60	1,0	9440	15,0	15,0
120	2,0	9420	35,0	20,0
180	3,0	9405	50,0	15,0
240	4,0	9390	65,0	15,0
300	5,0	9370	85,0	20,0
360	6,0	9350	105,0	20,0

**Tabla 28 Consumo 2000 rpm gasolina**

Tabla consumo 2000 rpm - gasolina				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	9255	0,0	-
60	1,0	9235	20,0	20,0
120	2,0	9210	45,0	25,0
180	3,0	9190	65,0	20,0
240	4,0	9165	90,0	25,0
300	5,0	9145	110,0	20,0
360	6,0	9120	135,0	25,0

**Tabla 29 Consumo 2500 rpm gasolina**

Tabla resumen				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	9030	0,0	-
60	1,0	9005	25,0	25,0
120	2,0	8980	50,0	25,0
180	3,0	8955	75,0	25,0
240	4,0	8930	100,0	25,0
300	5,0	8910	120,0	20,0
360	6,0	8885	145,0	25,0

**Tabla 30 Consumo 3000 rpm gasolina**

Tabla resumen				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Masa [g]	Consumo [g]	Consumo [g/min]
0	0,0	8775	0,0	-
60	1,0	8745	30,0	30,0
120	2,0	8710	65,0	35,0
180	3,0	8675	100,0	35,0
240	4,0	8645	130,0	30,0
300	5,0	8615	160,0	30,0
360	6,0	8585	190,0	30,0

En la siguiente grafica se observa las curvas de consumo de combustible con inyección de HHO al 40% NaOH al 40% en las siguientes pruebas 1000 RPM 1500 RPM 2000 RPM 2500 RPM 3000 RPM.

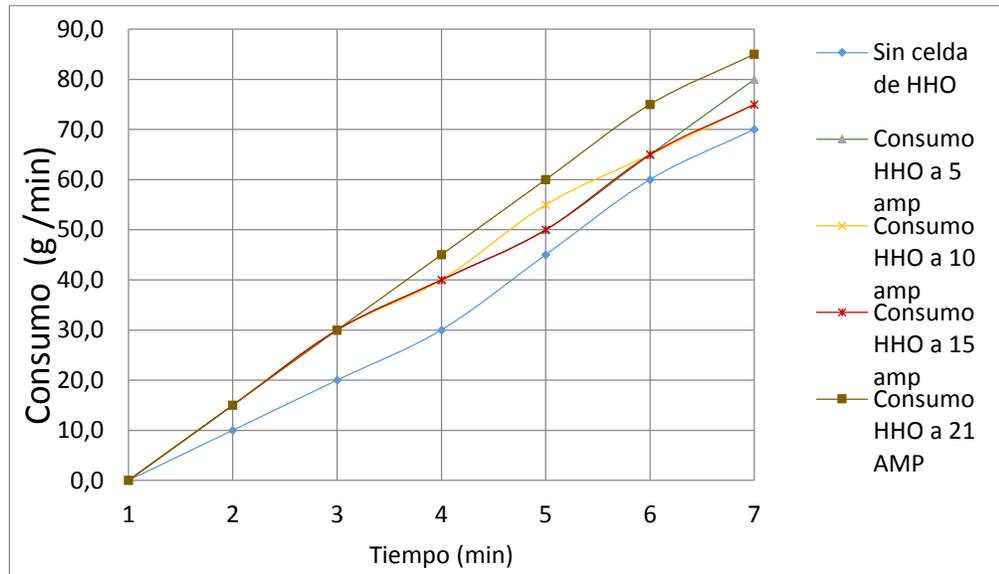


Figura 14 Consumo de gasolina -HHO NaOH 40% a 1000 rpm

Tabla 31 Consumo 1000 rpm gasolina – celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones

Tabla resumen 1000 rpm gasolina - HHO - NaOH al 40%						
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Consumo [g] sin celda	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 21 Amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	10,0	15,0	15,0	15,0	15,0
120	2,0	20,0	30,0	30,0	30,0	30,0
180	3,0	30,0	40,0	40,0	40,0	45,0
240	4,0	45,0	50,0	55,0	50,0	60,0
300	5,0	60,0	65,0	65,0	65,0	75,0
360	6,0	70,0	80,0	75,0	75,0	85,0

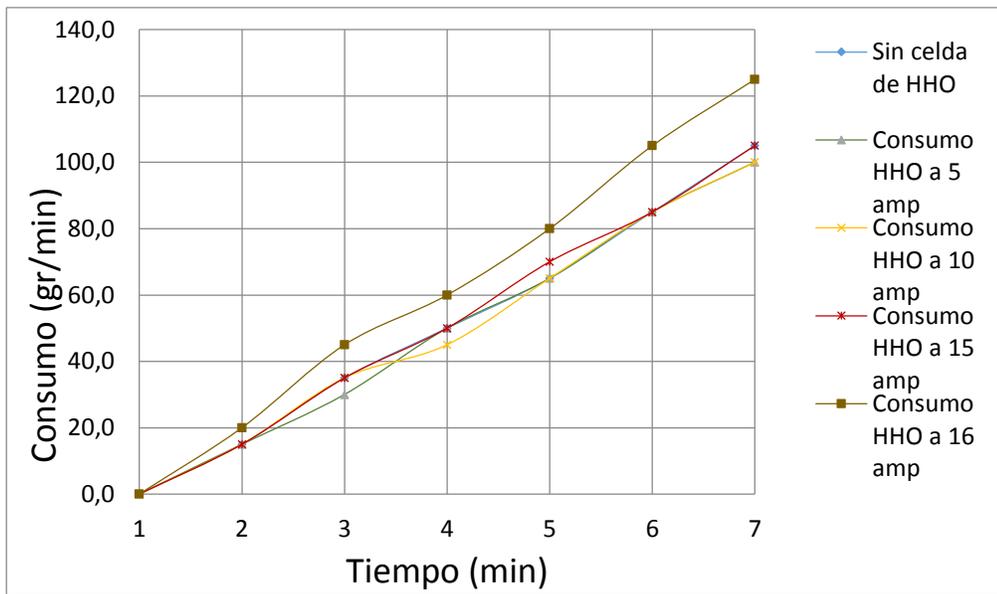


Figura 15 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 1500 rpm

Tabla 32 Consumo 1500 rpm gasolina – celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones

Tabla resumen 1500 rpm gasolina - HHO - NaOH al 40%						
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] sin celda	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 16 Amp
0	0,0	0	0,0	0	0	0
60	1,0	15	15,0	15,0	15,0	20,0
120	2,0	35	30,0	35,0	35,0	45,0
180	3,0	50	50,0	45,0	50,0	60,0
240	4,0	65	65,0	65,0	70,0	80,0
300	5,0	85	85,0	85,0	85,0	105,0
360	6,0	105	100,0	100,0	105,0	125,0

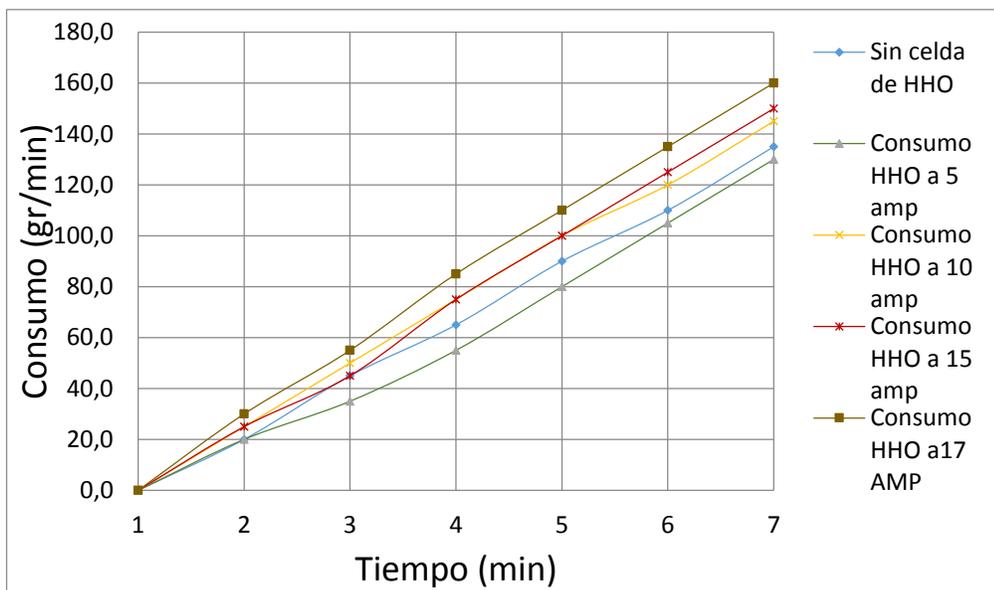


Figura 16 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 2000 rpm

Tabla 33 Consumo 2000 rpm gasolina – celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones

Tabla resumen 2000 rpm gasolina - HHO - NaOH al 40%						
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] sin celda	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 17 Amp
0	0,0	0	0,0	0	0	0
60	1,0	20	20,0	25,0	25,0	30,0
120	2,0	45	35,0	50,0	45,0	55,0
180	3,0	65	55,0	75,0	75,0	85,0
240	4,0	90	80,0	100,0	100,0	110,0
300	5,0	110	105,0	120,0	125,0	135,0
360	6,0	135	130,0	145,0	150,0	160,0

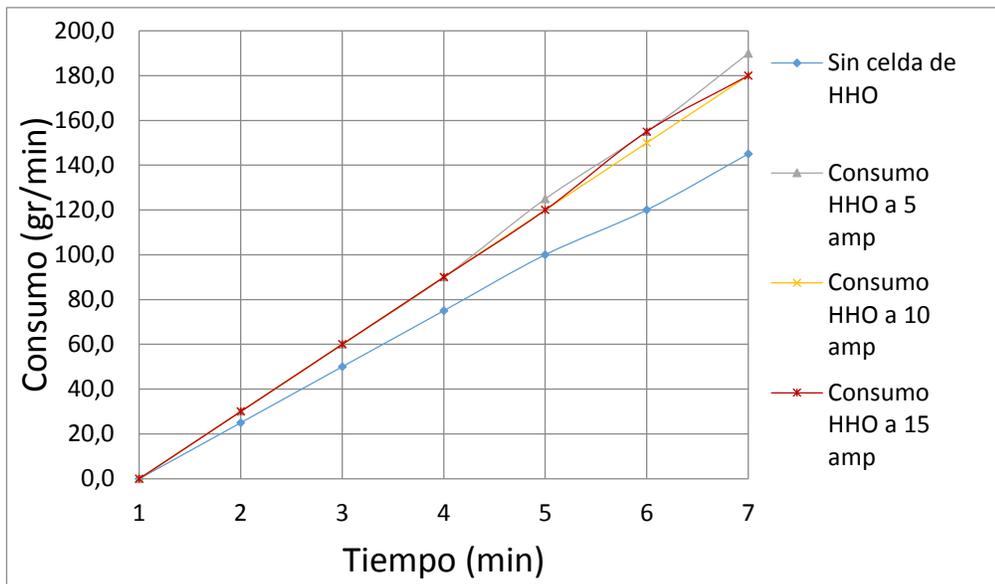


Figura 17 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 2500 rpm

Tabla 34 Consumo 2500 rpm gasolina – celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones

Tabla resumen 2500 rpm gasolina - HHO - NaOH al 40%						
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] sin celda	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 17 Amp
0	0,0	0	0,0	0	0	0
60	1,0	25	30,0	30,0	30,0	35,0
120	2,0	50	60,0	60,0	60,0	70,0
180	3,0	75	90,0	90,0	90,0	105,0
240	4,0	100	125,0	120,0	120,0	140,0
300	5,0	120	155,0	150,0	155,0	175,0
360	6,0	145	190,0	180,0	180,0	210,0

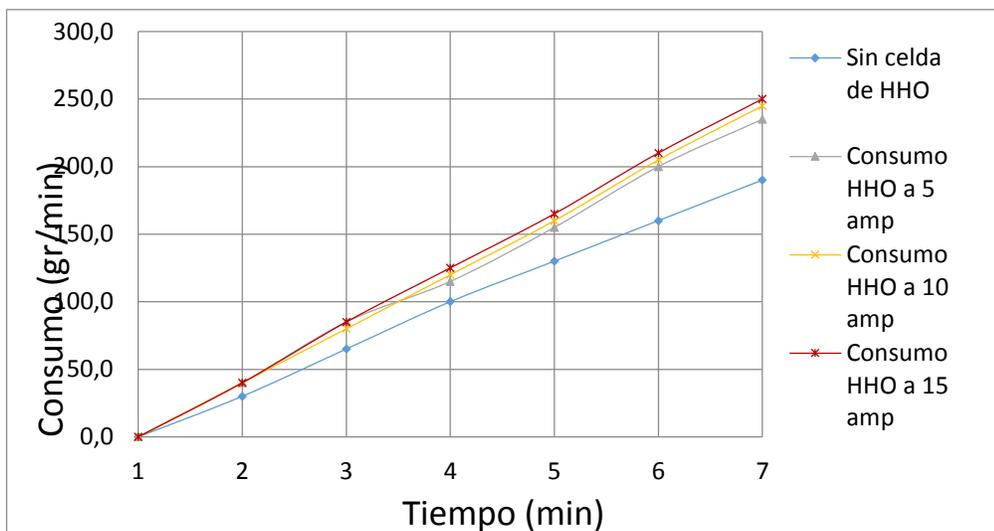


Figura 18 Consumo de gasolina HHO NaOH 40% a 3000 rpm

Tabla 35 Consumo 3000 rpm gasolina – celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones

Tabla resumen 3000 rpm Gasolina - HHO - NaOH al 40%						
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] sin celda	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 17 Amp
0	0,0	0	0,0	0	0	0
60	1,0	30	40,0	40,0	40,0	40,0
120	2,0	65	85,0	80,0	85,0	80,0
180	3,0	100	115,0	120,0	125,0	125,0
240	4,0	130	155,0	160,0	165,0	165,0
300	5,0	160	200,0	205,0	210,0	205,0
360	6,0	190	235,0	245,0	250,0	250,0

Al realizar las pruebas con celda de hidrógeno al 40% NaOH se obtuvieron las siguientes graficas en diferentes condiciones de Amperaje.

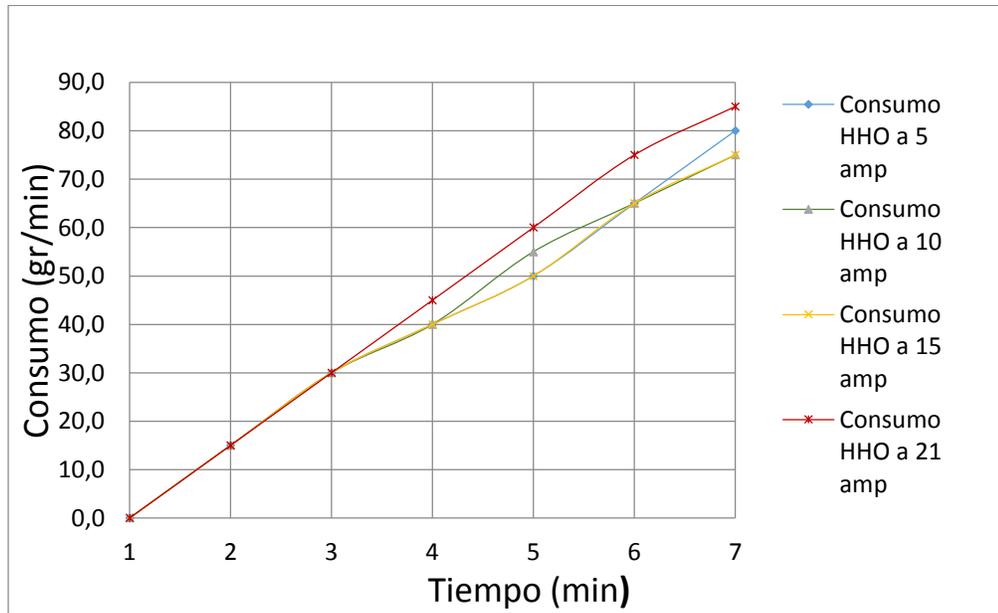


Figura 19 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 1000 rpm

Tabla 36 Consumo 1000 rpm celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones de amperaje

Tabla resumen 1000 rpm - HHO - NaOH al 40%					
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 21 Amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	15,0	15,0	15,0	15,0
120	2,0	30,0	30,0	30,0	30,0
180	3,0	40,0	40,0	40,0	45,0
240	4,0	50,0	55,0	50,0	60,0
300	5,0	65,0	65,0	65,0	75,0
360	6,0	80,0	75,0	75,0	85,0

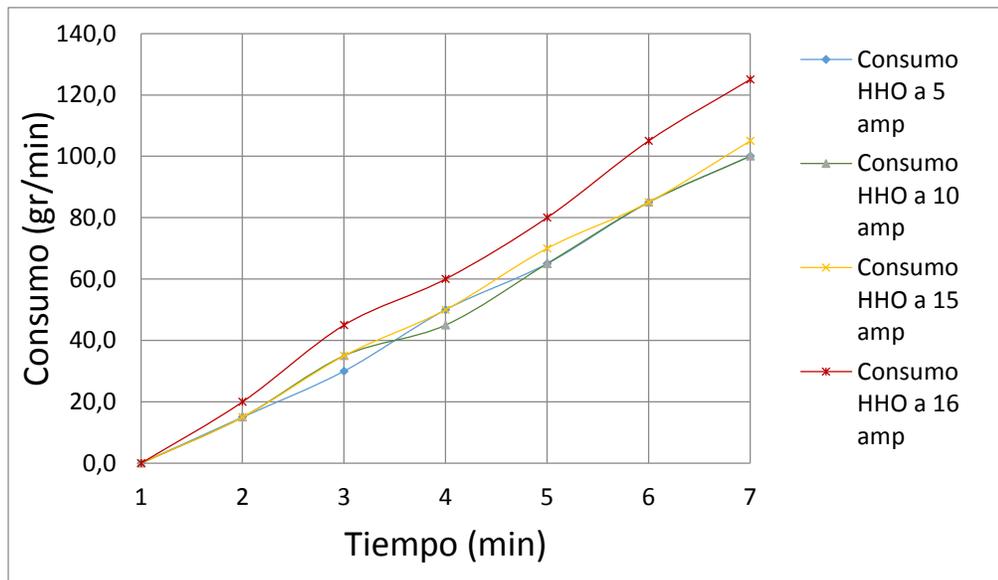


Figura 20 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 1500 RPM

Tabla 37 Consumo 1500 rpm celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones de amperaje

Tabla resumen 1500 rpm - HHO - NaOH al 40%					
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] 5 amp	Consumo [g] 10 amp	Consumo [g] 15 amp	Consumo [g] 16 amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	15,0	15,0	15,0	20,0
120	2,0	30,0	35,0	35,0	45,0
180	3,0	50,0	45,0	50,0	60,0
240	4,0	65,0	65,0	70,0	80,0
300	5,0	85,0	85,0	85,0	105,0
360	6,0	100,0	100,0	105,0	125,0

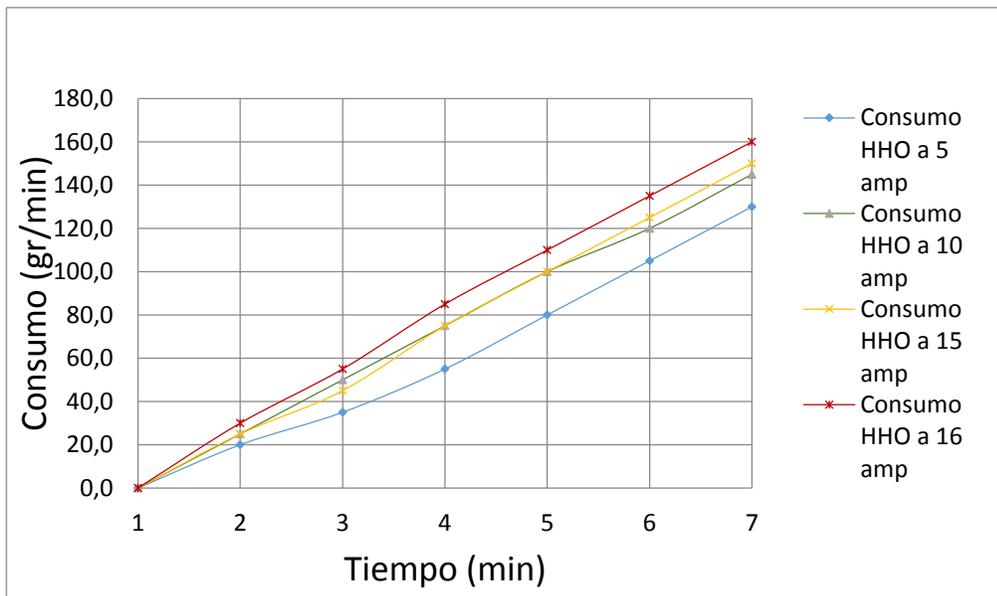


Figura 21 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 2000 rpm

Tabla 38 Consumo 2000 rpm celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones de amperaje

Tabla resumen 2000 rpm - HHO - NaOH al 40%					
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] 5 Amp	Consumo [g] 10 Amp	Consumo [g] 15 Amp	Consumo [g] 16 Amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	20,0	25,0	25,0	30,0
120	2,0	35,0	50,0	45,0	55,0
180	3,0	55,0	75,0	75,0	85,0
240	4,0	80,0	100,0	100,0	110,0
300	5,0	105,0	120,0	125,0	135,0
360	6,0	130,0	145,0	150,0	160,0

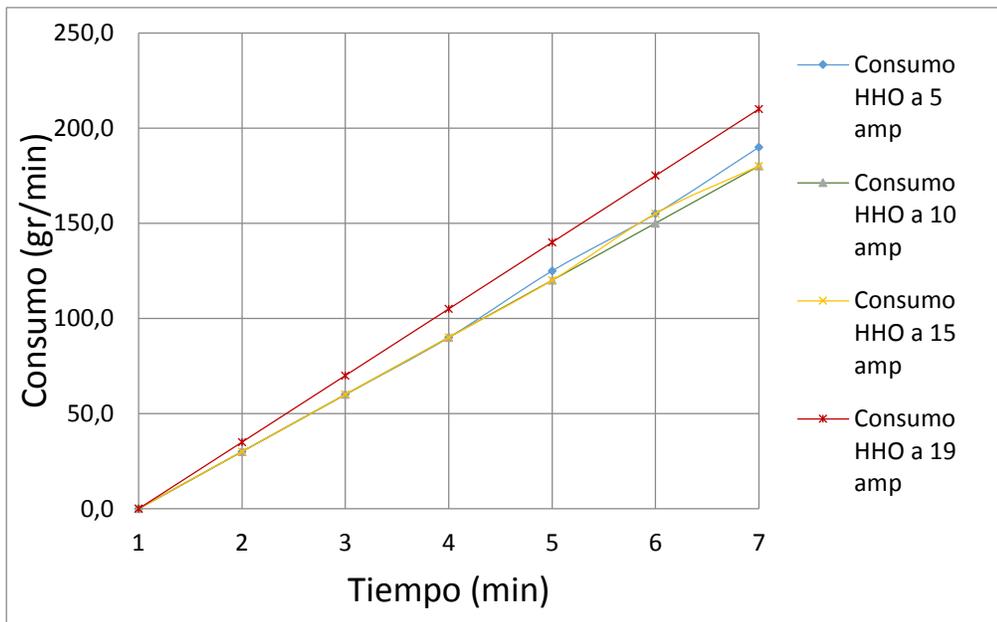


Figura 22 Consumo de HHO NaOH 40% a 2500 rpm

Tabla 39 Consumo 2500 rpm celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones de amperaje

Tabla resumen 2500 rpm - HHO - NaOH al 40%					
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] 5 amp	Consumo [g] 10 amp	Consumo [g] 15 amp	Consumo [g] 19 amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	30,0	30,0	30,0	35,0
120	2,0	60,0	60,0	60,0	70,0
180	3,0	90,0	90,0	90,0	105,0
240	4,0	125,0	120,0	120,0	140,0
300	5,0	155,0	150,0	155,0	175,0
360	6,0	190,0	180,0	180,0	210,0

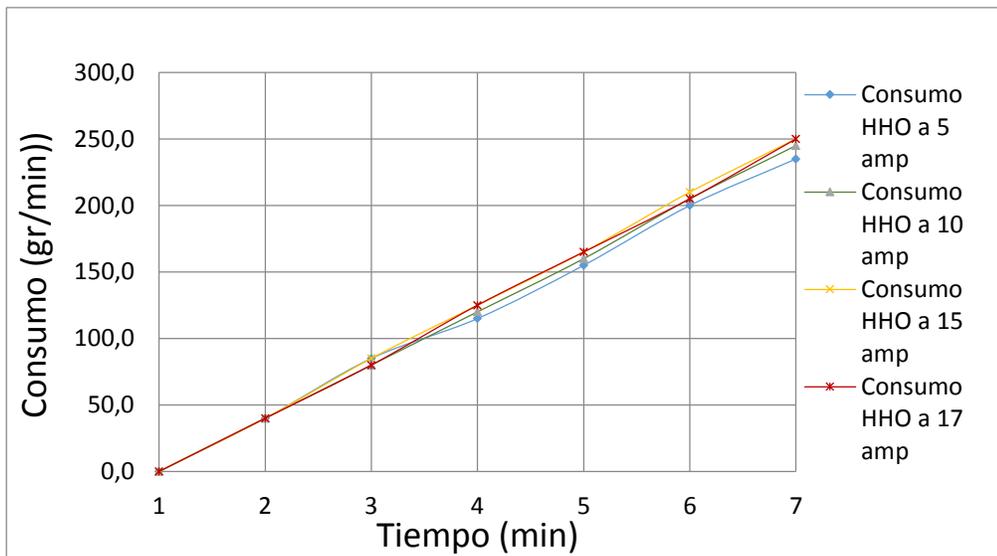


Figura 23 Consumo de gasolina con HHO NaOH 40% a 3000 rpm

Tabla 40 Consumo 3000 RPM Celda HHO NaOH 40% diferentes condiciones de amperaje

Tabla resumen 3000 rpm - HHO - NaOH al 40%					
TIEMPO [s]	TIEMPO [min]	Consumo [g] 5 amp	Consumo [g] 10 amp	Consumo [g] 15 amp	Consumo [g] 17 amp
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,0	40,0	40,0	40,0	40,0
120	2,0	85,0	80,0	85,0	80,0
180	3,0	115,0	120,0	125,0	125,0
240	4,0	155,0	160,0	165,0	165,0
300	5,0	200,0	205,0	210,0	205,0
360	6,0	235,0	245,0	250,0	250,0

Realizando el promedio de las pruebas realizadas con gasolina y celda de hidrógeno al 40% NaOH a 1000 RPM, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm 3000 rpm en los siguientes amperajes 5 amp, 10 amp, 15 amp y el máximo amperaje se obtuvo la siguiente gráfica.

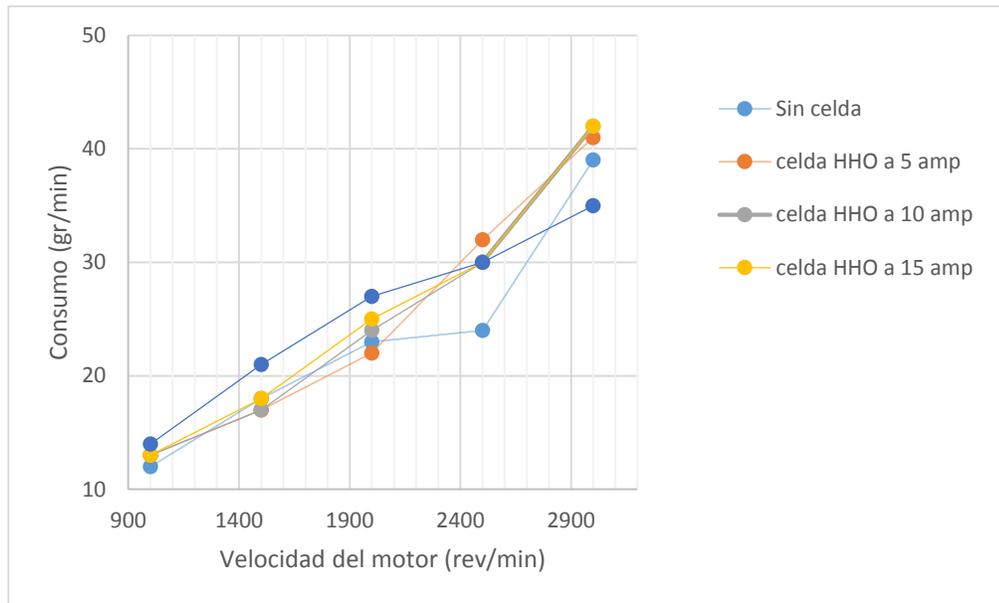


Figura 24 Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH

Tabla 41 Tabla Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH

Tabla Consumo Promedio De Gasolina – HHO AL 40% NaOH					
rev/min	Sin celda	5 Amp	10 Amp	15 Amp	16-22 Amp
1000	12	13	13	13	14
1500	18	17	17	18	21
2000	23	22	24	25	27
2500	24	32	30	30	30
3000	39	41	42	42	35

Al realizar las diferentes pruebas con gas natural vehicular y celda de hidrógeno al 40% NaOH se obtuvieron las siguiente grafica de consumo.

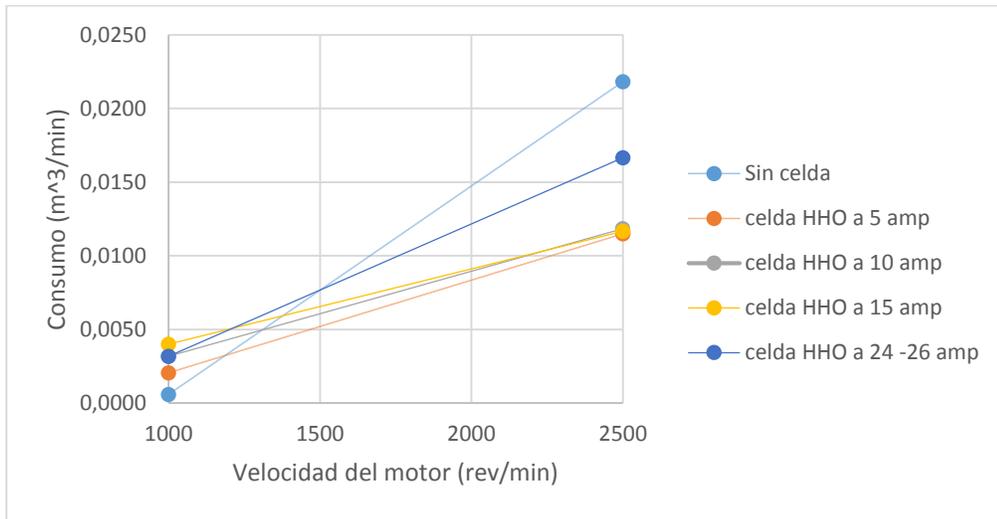


Figura 25 Gráfica consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH

Tabla 42 Tabla consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH

Tabla promedio 1000 rpm - 2000 rpm gas natural - HHO - NaOH al 40%					
rev/min	Sin celda	5 amp	10 amp	15 amp	24-26 amp
1000	0,0006	0,0021	0,0032	0,0040	0,0032
2500	0,0218	0,0115	0,0118	0,0117	0,0167

En las siguientes tablas se muestra el análisis de gases que se obtuvieron en las diferentes pruebas realizadas con gasolina, celda de hidrógeno al 40% NaOH y gas natural vehicular, con condiciones diferentes.

**Tabla 43 Análisis de gases a 1000 rpm gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente**

Pruebas a 1000 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	
SIN CELDA DE HHO	0,23	0,88	0,56	6,49	14,22	13,65	16,00	72,00	56,00	1,24	17,34	2,41	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,12	1122,93
	0,23	0,78	1,05	2,00	14,97	12,36	16,00	99,00	74,00	0,37	18,98	3,18	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,22	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	0,00	1,52	1,12	1,90	13,78	12,82	0,00	120,00	5,00	1,18	20,53	4,13	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,20	1153,68
	0,12	1,02	0,84	1,88	13,99	12,29	39,00	107,00	88,00	1,18	20,74	4,00	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,27	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	0,07	0,82	0,67	1,36	14,06	12,22	39,00	101,00	85,00	1,26	20,53	4,28	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,29	1113,55
	0,08	1,05	0,81	1,75	13,98	12,30	28,00	112,00	83,00	1,21	20,74	3,95	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,27	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	0,19	0,79	0,58	7,73	14,34	13,75	50,00	101,00	82,00	1,25	12,63	2,20	0,00	0,00	0,00	1,04	2,29	1,10	1086,61
	0,00	0,35	0,08	1,81	14,37	12,98	0,00	38,00	20,00	1,26	20,95	3,43	0,00	0,00	0,00	1,05	2,50	1,24	
EMISIONES A MAX AMP	0,00	0,01	0,00	7,34	14,13	13,61	0,00	0,00	0,00	1,62	16,05	2,53	0,00	0,00	0,00	1,07	2,49	1,14	1131,48
	0,00	0,00	0,00	2,17	14,17	12,62	0,00	13,00	5,00	1,67	20,84	4,19	0,00	0,00	0,00	1,08	2,50	1,30	

**Tabla 44 Análisis de gases a 1500 rpm gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente**

Pruebas a 1500 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	
SIN CELDA DE HHO	0,69	1,68	1,51	5,58	14,00	13,26	49,00	128,00	113,00	0,74	18,11	2,04	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,08	1544,28
	0,14	1,75	1,37	1,74	13,89	12,10	32,00	139,00	103,00	0,71	20,84	3,72	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,25	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	0,36	0,88	0,78	6,97	14,58	13,86	27,00	51,00	42,00	0,70	17,20	1,83	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,08	1574,10
	0,04	1,04	0,66	1,76	14,54	12,80	8,00	60,00	39,00	0,65	18,97	3,33	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,24	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	0,04	0,95	0,63	1,82	14,78	12,83	17,00	67,00	48,00	0,68	20,32	3,38	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,24	1563,08
	0,04	0,95	0,63	1,82	14,78	12,83	17,00	67,00	48,00	0,68	20,32	3,38	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,24	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	0,02	0,82	0,50	1,11	14,85	12,81	7,00	50,00	37,00	0,70	20,22	3,55	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,25	1574,54
	0,02	0,81	0,57	1,82	14,68	13,00	10,00	57,00	41,00	0,68	20,01	3,17	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,23	
EMISIONES A MAX 16 AMP	0,00	0,54	0,07	3,66	15,02	13,55	0,00	14,00	3,00	0,67	20,74	2,86	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,20	1565,00
	0,00	0,27	0,12	2,12	14,97	13,31	3,00	17,00	9,00	0,64	21,05	3,20	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,24	

Tabla 45 Análisis de gases a 2500 rpm gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente

Pruebas a 2500 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
SIN CELDA DE HHO	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	2572,72
	0,00	0,39	0,14	1,06	15,25	13,20	0,00	35,00	17,00	0,21	19,58	3,22	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,25	
	0,00	0,07	0,01	1,72	15,10	13,17	0,00	19,00	7,00	0,32	19,25	3,20	0,00	0,00	0,00	1,01	2,50	1,26	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	2675,20
	0,00	0,55	0,04	2,80	14,78	13,23	3,00	70,00	16,00	1,01	20,74	3,39	0,00	0,00	0,00	1,04	2,50	1,25	
	0,00	0,01	0,00	2,32	15,03	13,29	0,00	0,00	0,00	0,50	20,95	3,24	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,24	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	2549,34
	0,00	0,00	0,00	2,98	14,74	13,17	0,00	10,00	1,00	1,02	20,84	3,31	0,00	0,00	0,00	1,04	2,50	1,24	
	0,00	0,00	0,00	2,41	14,86	13,15	0,00	1,00	0,00	0,60	18,46	3,23	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,25	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	2549,41
	0,00	0,01	0,00	1,58	15,05	13,06	0,00	5,00	0,00	0,60	20,32	3,58	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,27	
	0,00	0,00	0,00	2,05	14,83	13,16	0,00	0,00	0,00	0,78	20,22	3,27	0,00	0,00	0,00	1,03	2,58	1,25	
EMISIONES A MAX 19 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	2675,20
	0,00	0,48	0,04	3,81	14,72	13,38	0,00	17,00	1,00	0,91	20,84	2,95	0,00	0,00	0,00	1,04	2,50	1,21	
	0,00	0,00	0,00	2,11	14,91	13,13	0,00	11,00	1,00	0,85	19,71	3,44	0,00	0,00	0,00	1,03	2,50	1,27	

Tabla 46 Análisis de gases a 3000 rpm gasolina – HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente

Pruebas a 3000 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
SIN CELDA DE HHO	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	3092,39
	0,00	0,01	0,00	7,43	15,16	14,65	0,00	0,00	0,00	0,34	16,23	1,30	0,00	0,00	0,00	1,01	2,49	1,07	
	0,00	0,01	0,00	2,22	15,12	13,38	0,00	26,00	15,00	0,45	20,74	3,04	0,00	0,00	0,00	1,02	2,50	1,24	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	3031,02
	0,00	0,41	0,21	1,45	15,19	13,20	0,00	6,00	0,00	0,15	19,30	3,13	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,24	
	0,04	0,18	0,11	2,25	15,25	13,57	0,00	9,00	0,00	0,13	18,45	2,63	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,21	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	3034,35
	0,05	0,33	0,22	3,96	15,03	13,73	0,00	9,00	2,00	0,13	20,84	2,21	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,16	
	0,03	0,67	0,45	2,17	14,92	13,32	0,00	8,00	1,00	0,13	19,08	2,57	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,20	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	3035,88
	0,04	0,51	0,39	1,73	15,15	13,32	3,00	19,00	12,00	0,16	19,08	2,91	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,22	
	0,04	0,47	0,36	2,25	15,04	13,47	0,00	14,00	6,00	0,13	19,81	2,56	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50	1,20	
EMISIONES A MAX 17 AMP	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	3096,57
	0,00	0,05	0,01	3,05	15,23	13,81	0,00	0,00	0,00	0,13	19,61	2,31	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,18	
	0,00	0,04	0,00	2,44	15,39	13,68	0,00	13,00	5,00	0,18	20,64	2,80	0,00	0,00	0,00	1,00	2,50	1,22	

Tabla 47 Análisis de gases a 1000 rpm gas natural vehicular- HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente

Pruebas a 1000 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	
SIN CELDA DE HHO	0,01	0,22	0,06	6,42	11,86	11,49	56,00	77,00	66,00	1,24	15,05	2,07	0,00	0,00	0,00	1,06	2,50	1,13	1124,75
	0,00	0,56	0,25	1,76	11,81	10,54	4,00	79,00	58,00	1,22	19,04	3,40	0,00	0,00	0,00	1,50	2,50	1,26	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	0,00	0,00	0,00	7,07	11,84	11,37	15,00	68,00	33,00	1,45	13,58	3,33	0,00	0,00	0,00	1,08	2,31	1,14	1102,26
	0,00	0,00	0,00	7,25	11,85	11,29	24,00	76,00	58,00	1,28	12,51	2,32	0,00	0,00	0,00	1,07	2,17	1,15	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	0,00	0,00	0,00	6,99	11,61	11,24	26,00	62,00	48,00	1,38	12,51	2,16	0,00	0,00	0,00	1,08	2,22	1,14	1063,94
	0,00	0,02	0,00	1,02	11,94	10,55	2,00	90,00	34,00	1,24	19,29	3,65	0,00	0,00	0,00	1,07	2,50	1,29	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	0,00	0,00	0,00	7,56	11,75	11,40	30,00	78,00	62,00	1,46	11,78	2,17	0,00	0,00	0,00	1,08	2,06	1,13	1036,52
	0,00	0,00	0,00	6,23	11,77	11,27	22,00	54,00	44,00	1,56	15,66	2,44	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,16	
EMISIONES A MAX AMP	0,00	0,01	0,00	0,76	11,69	9,66	0,00	66,00	44,00	1,55	19,89	5,05	0,00	0,00	0,00	1,09	2,05	1,40	1039,17
	0,00	0,00	0,00	1,65	11,54	10,27	0,00	63,00	47,00	1,91	10,75	4,86	0,00	0,00	0,00	1,11	2,05	1,32	

Tabla 48 Análisis de gases a 2500 rpm gas natural vehicular- HHO al 40% NaOH a diferentes condiciones de corriente

Pruebas a 2500 rpm																			
	CO %			CO2%			HC-PPM			O2			NOx			LAMDA			PROMEDIO DE RPM
	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	MIN	MAX	AVG	
SIN CELDA DE HHO	0,00	0,00	0,00	6,02	11,90	11,44	20,00	44,00	29,00	1,42	15,79	2,26	0,00	0,00	0,00	1,08	2,5	1,14	2534,15
	0,00	0,00	0,00	1,47	11,75	10,42	0,00	37,00	21,00	1,62	18,71	4,06	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,32	
EMISIONES - HHO A 5 AMP	0,00	0,00	0,00	11,74	11,78	11,42	14,00	42,00	29,00	1,51	14,92	2,27	0,00	0,00	0,00	1,08	2,50	1,14	2521,84
	0,00	0,00	0,00	6,38	11,87	11,37	19,00	41,00	28,00	1,62	15,74	2,49	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,16	
EMISIONES - HHO A 10 AMP	0,00	0,00	0,00	1,95	11,56	10,33	0,00	36,00	21,00	1,75	18,20	3,95	0,00	0,00	0,00	1,10	2,50	1,32	2530,20
	0,00	0,01	0,00	1,79	12,13	10,60	2,00	45,00	28,00	1,11	19,68	3,81	0,00	0,00	0,00	1,06	2,50	1,30	
EMISIONES - HHO A 15 AMP	0,00	0,01	0,00	1,96	11,77	10,71	5,00	37,00	23,00	1,63	17,89	3,54	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,28	2523,93
	0,00	0,00	0,00	2,22	11,87	10,53	0,00	37,00	21,00	1,60	17,80	3,94	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,31	
EMISIONES A MAX 24 AMP	0,00	0,01	0,00	2,04	11,80	10,55	0,00	34,00	17,00	1,58	18,00	3,76	0,00	0,00	0,00	1,09	2,50	1,30	2522,53
	0,00	0,00	0,00	6,91	11,84	11,40	10,00	39,00	23,00	1,55	14,42	2,28	0,00	0,00	0,00	1,09	2,42	1,14	

Se grafican los promedios de las pruebas realizadas con gasolina y HHO a 40% NaOH se obtiene las siguientes gráficas.

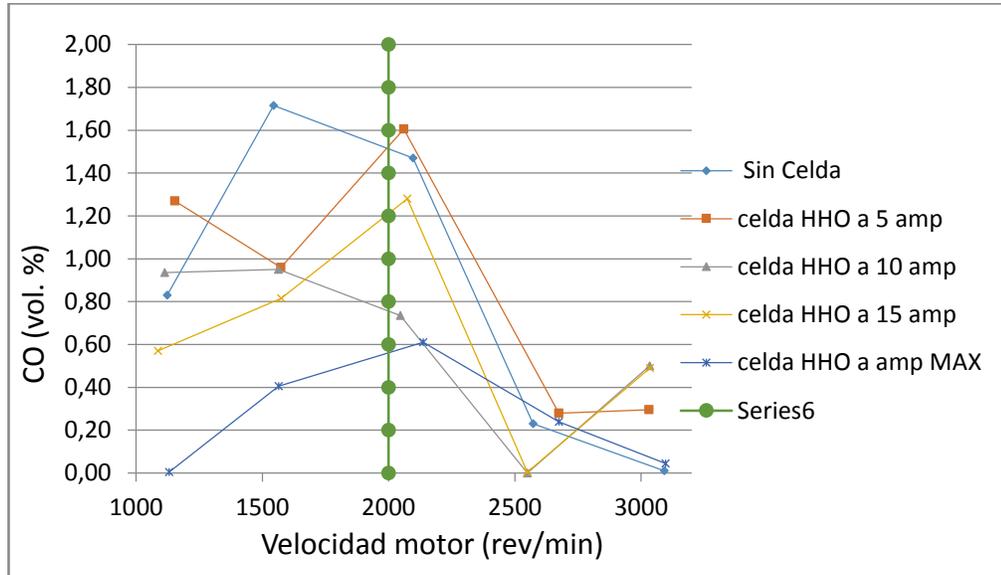


Figura 26 Emisiones de monóxido de carbono con gasolina- HHO al 40% NaOH

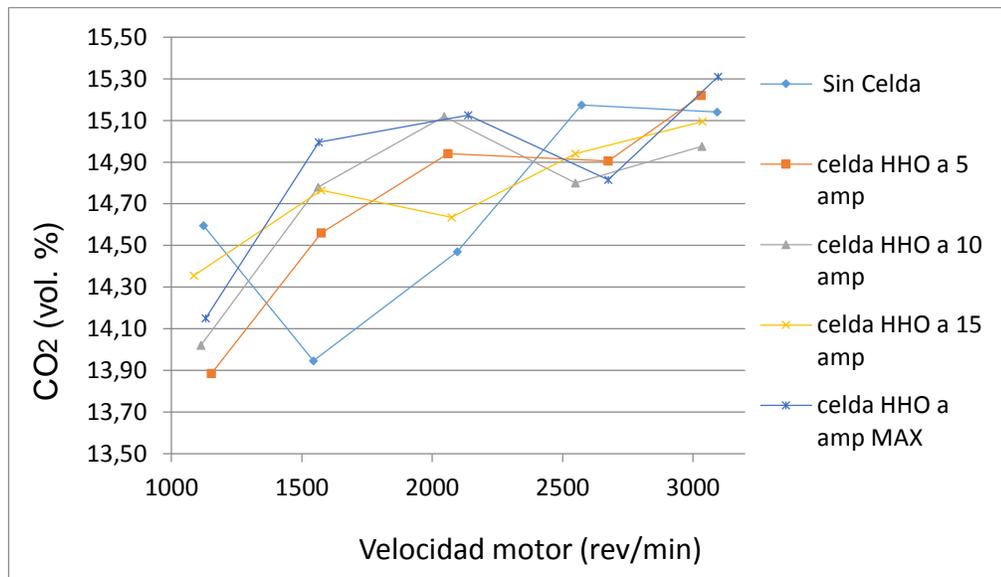


Figura 27 Emisiones de dióxido de carbono con gasolina- HHO al 40% NaOH

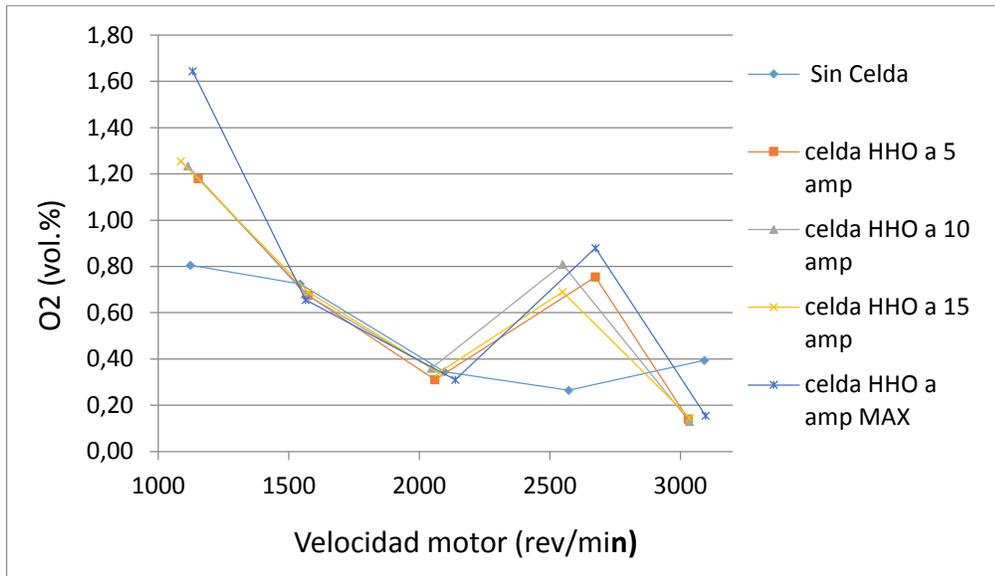


Figura 28 Emisiones de oxígeno con gasolina- HHO al 40% NaOH

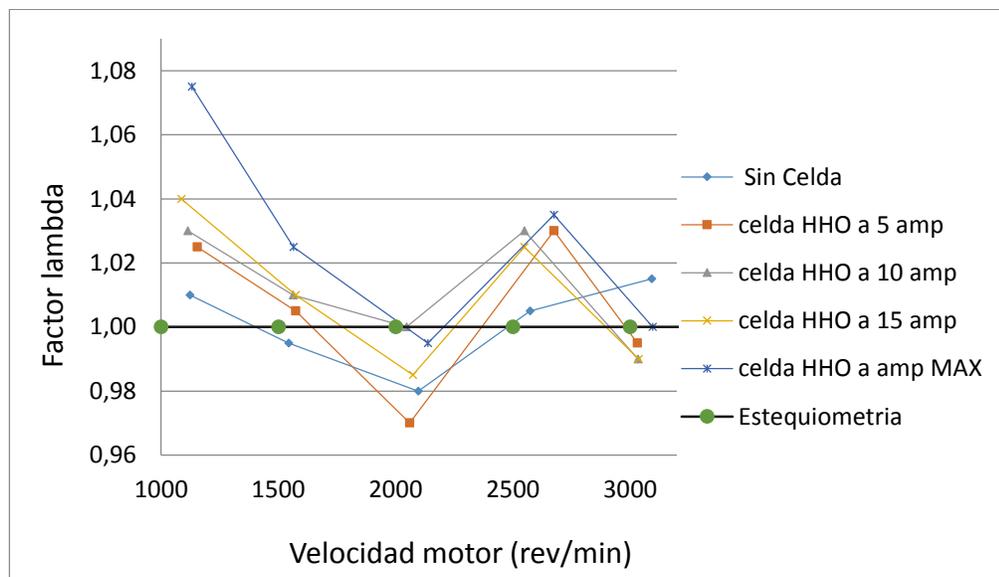


Figura 29 Factor lambda con gasolina- HHO al 40% NaOH

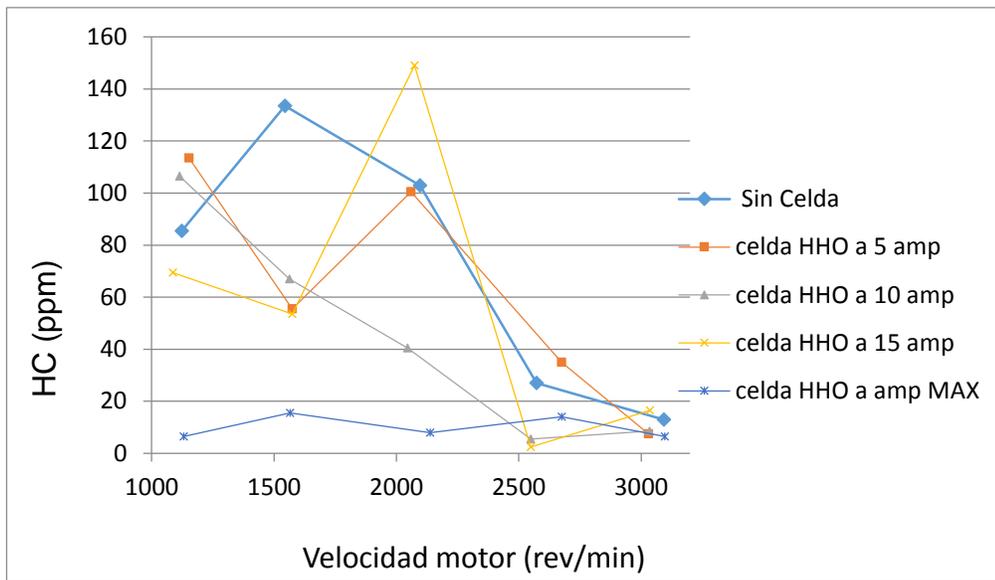


Figura 30 Emisiones de hidrocarburos pesados con gasolina- HHO al 40% NaOH

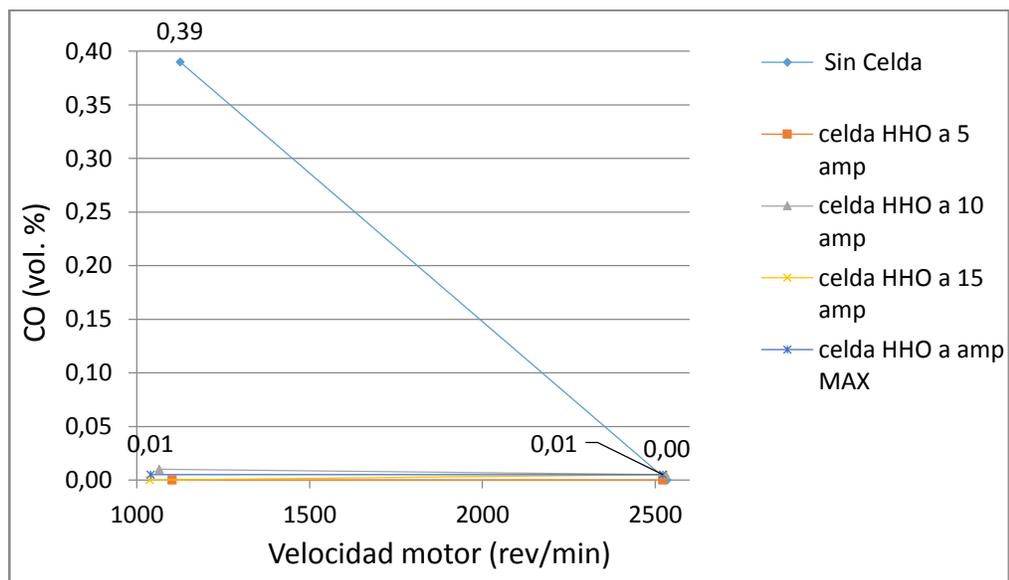


Figura 31 Emisiones de monóxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

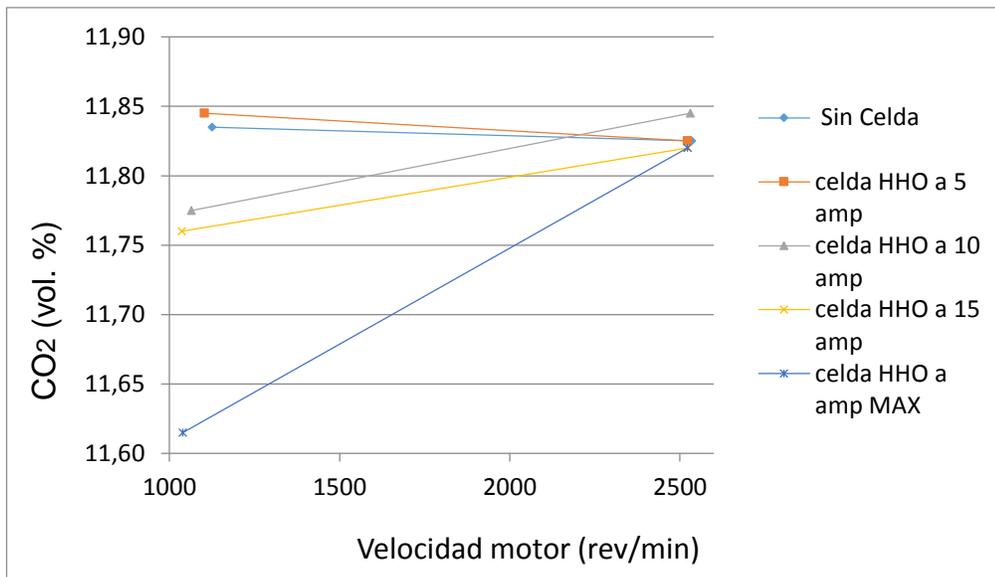


Figura 32 Emisiones de dióxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

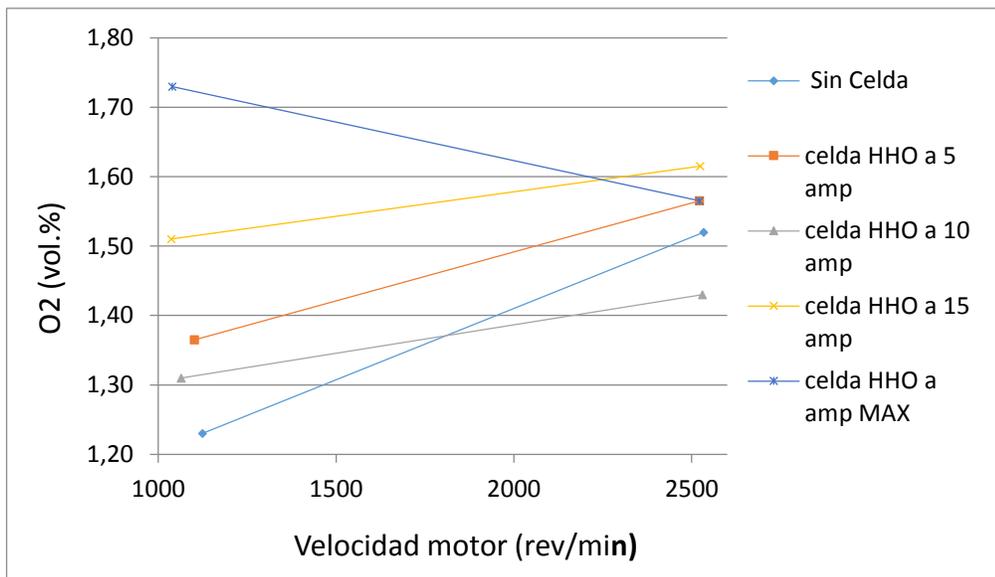


Figura 33 Emisiones de oxígeno con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

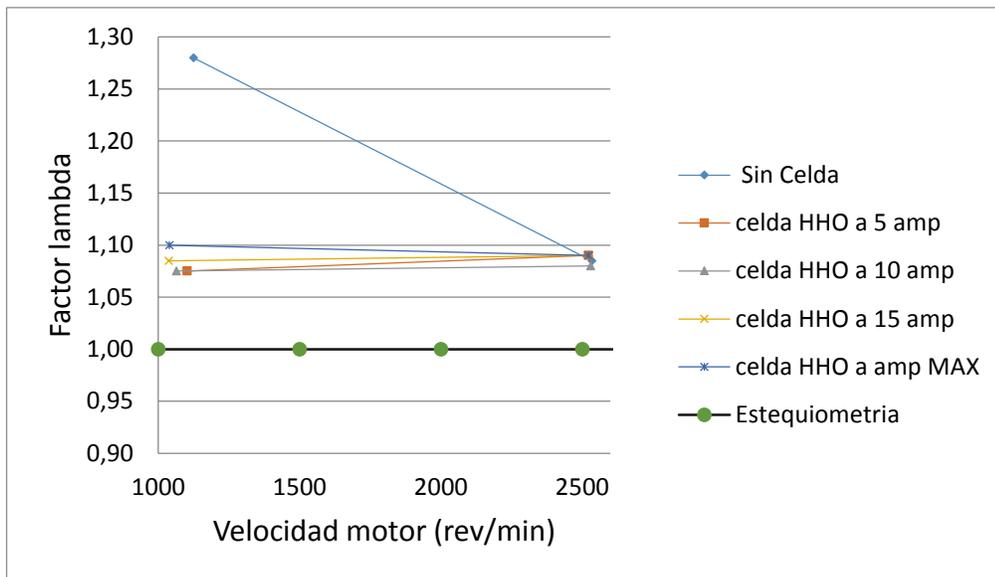


Figura 34 Factor lambda con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

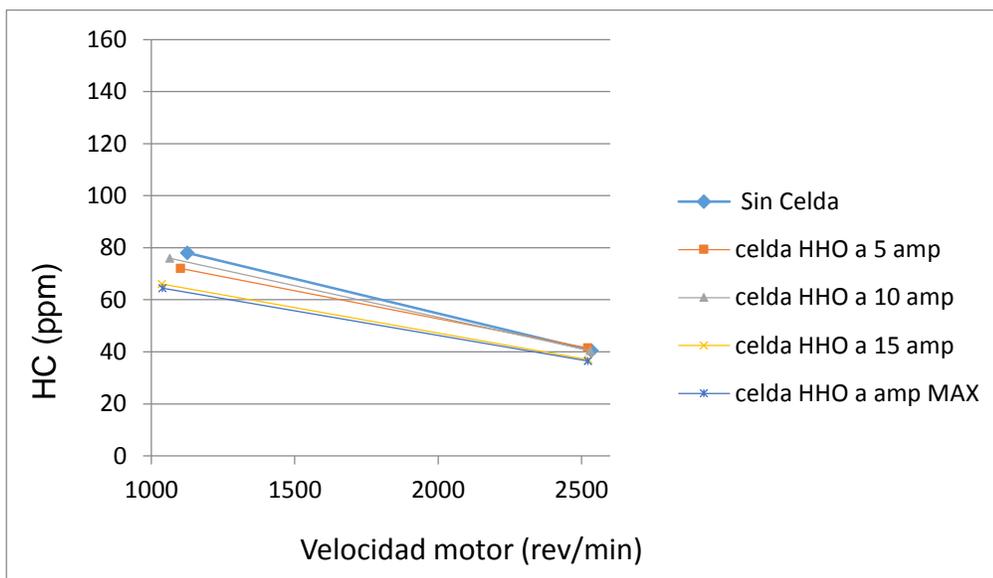


Figura 35 Emisiones de hidrocarburos pesados con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

## 10. ANÁLISIS DE DATOS

### RENDIMIENTO

En las Tablas 6-40 se resumen los datos recolectados durante la ejecución experimental para el funcionamiento de motor aveo en condiciones de solo gasolina y mezcla dual de gasolina-HHO a diferentes condiciones revoluciones de motor y corriente de alimentación en celda alcalina. Asimismo, en las Figuras 14-23 se muestran los consumos promedios de gasolina para el funcionamiento de motor aveo en condiciones de mezcla dual gasolina-HHO y gasolina para diferentes condiciones de revoluciones de motor y corriente de alimentación en celda alcalina.

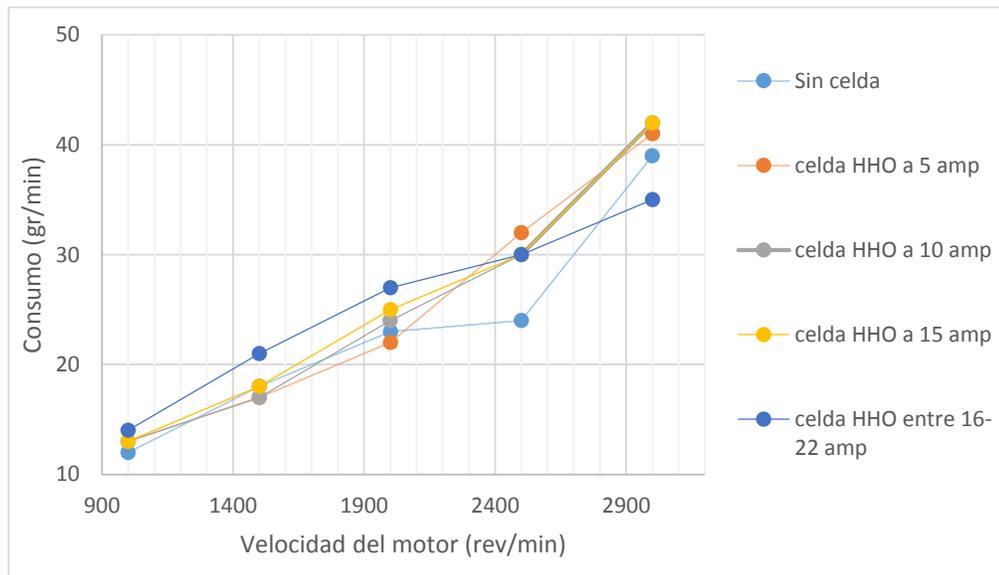
En la Figura 25 se muestra el efecto de introducir gas oxihidrógeno (HHO) en la cámara de combustión sobre el consumo de combustible (gasolina) a diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina (sin celda) y con la mezcla dual gasolina-HHO a diferentes condiciones de alimentación de celda (5-22 amperios).

La regulación de carga en los motores se efectúa controlando la cantidad de mezcla aire-gasolina que entra a los mismos. En el caso de los sistemas de alimentación por carburador, en los que en dicho componente se mezcla el aire con la gasolina. En los modernos motores de inyección, la regulación de la carga se efectúa mediante el control del volumen de aire que alimenta al motor, mezclándose con la gasolina en una fase posterior, antes de introducirse en la cavidad volumétrica.

La dosificación del combustible, la cual ha de guardar una estrecha relación con la cantidad de aire admitido, se lleva a cabo por el sistema de inyección electrónica, en los que la central de control (ECU) determina el tiempo que están abiertos los inyectores, permaneciendo estable su presión. El concepto de dosificación se define como la relación entre las cantidades de aire y gasolina que forman la mezcla que alimenta el motor. Como dosificación ideal, también llamada estequiometría, se considera 14,7 a 1, de forma que, por cada gramo de gasolina, hay 14,7 gramos de aire. Es importante destacar que la relación se determina en masa y no en volumen.

Una mezcla se considera rica cuando hay más gasolina de la debida, o menos aire del que corresponde, siempre tomando como referencia la dosificación ideal. Por el contrario, una mezcla se considera pobre, cuando la cantidad de aire es superior, o bien la de gasolina menor. También se hace referencia a la dosificación, mediante el llamado factor lambda, que es la relación entre la masa de aire introducida en la cavidad volumétrica, y la necesaria para que se produzca la combustión del combustible introducido, sin que sobre ni falta ninguno de los dos componentes ( $\lambda=1$  mezcla estequiométrica;  $\lambda<1$  mezcla rica;  $\lambda>1$  mezcla pobre).

En la Figura 36 la mezcla de gasolina-HHO en todas las condiciones de pruebas (1000-3000 rpm) y (5-22 amperios) el consumo de combustible aumentó cuando se compara el funcionamiento con celda de electrolisis y su funcionamiento solo a gasolina. Los porcentajes de aumento oscilan entre el 8 % para bajas revoluciones (1000rpm) y el 33% para revoluciones crucero (2500 rpm). La única condición de disminución en consumo de combustible se presentó a los 3000 rpm con una reducción de 10%. Estos resultados indican que el gas HHO mejora el proceso de combustión mediante el aumento de la eficiencia térmica del motor, el aumento en consumo de combustible está justificado en que la mezcla de HHO contiene un 52% de hidrógeno y 48% de oxígeno, este excedente de oxígeno el sistema lo detecta y ya que la dosificación de gasolina guardar una estrecha relación con la cantidad de aire admitido al aumentar la cantidad de oxígeno presente el sistema aumenta el tiempo en que los inyectores permanecen abiertos ingresando más combustible y presentando los aumentos de 8% y 33%.



**Figura 36 Consumo promedio de gasolina – HHO al 40% NaOH**

En la Figura 37 se muestra el efecto de introducir gas oxihidrógeno (HHO) en la cámara de combustión sobre el consumo de combustible (gas natural GNV) a diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a GNV (sin celda) y con la mezcla dual GNV-HHO a diferentes condiciones de alimentación de celda (5-26 amperios).

En la Figura 37 la mezcla de GNV-HHO en todas las condiciones de pruebas (1000 y 2500 rpm) y (5-26 amperios) el consumo de combustible (GNV) disminuyó cuando se compara el funcionamiento con GNV a altas revoluciones. Los porcentajes de reducción a revoluciones crucero (2500 rpm) fueron de 43%.

Estos resultados indican que el gas HHO mejora el proceso de combustión a altas revoluciones (2500rpm) mediante el aumento de la eficiencia térmica del motor y la reducción del consumo de combustible (GNV). Al comparar el gas HHO con la GNV, el gas HHO se encuentre en fase gaseosa lo que representa mayor eficiencia en términos de la estructura química del combustible. El hidrógeno y el oxígeno presentes en el gas HHO existen como dos átomos por unidad de combustible como grupos independientes que facilita la interacción con la chispa de encendido y la compresión de la mezcla combustible/aire + HHO en comparación con las miles de largas moléculas de hidrocarburos de las que se compone la gasolina.

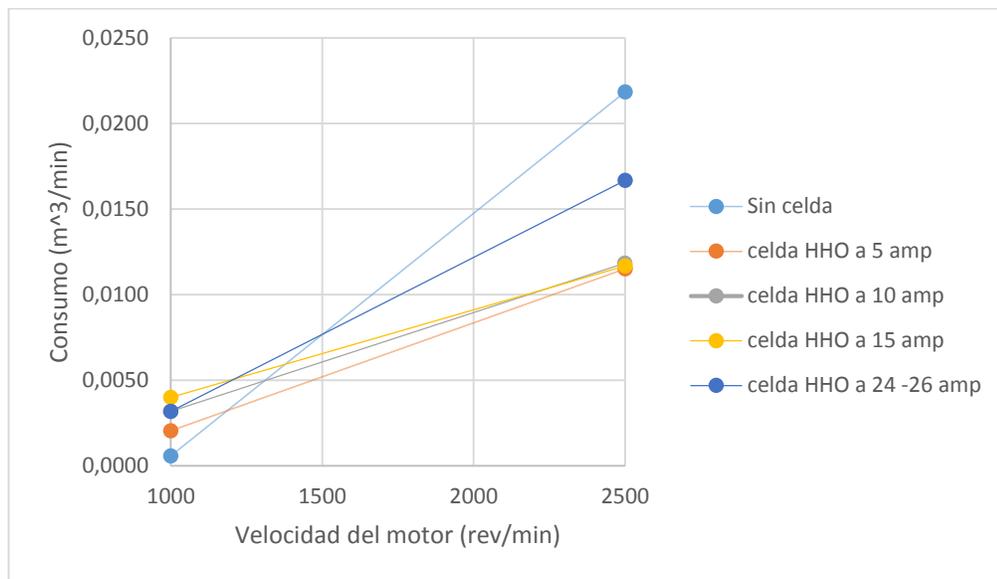


Figura 37 Gráfica consumo promedio de gas natural – HHO al 40% NaOH

## EMISIONES

En las Tablas 43-48 se resumen los datos recolectados durante la ejecución experimental para el funcionamiento de motor aveo en condiciones de solo gasolina y mezcla dual de gasolina-HHO a diferentes condiciones revoluciones de motor y corriente de alimentación en celda alcalina. Asimismo, en las Figuras 26-30 se muestran las emisiones contaminantes para el funcionamiento de motor aveo en condiciones de mezcla dual gasolina-HHO y gasolina para diferentes condiciones de revoluciones de motor y corriente de alimentación en celda alcalina.

Las gráficas relevantes para evaluar el beneficio en emisiones contaminantes de la integración de tecnologías como las celdas alcalinas son la variación del factor lambda, monóxido de carbono e hidrocarburos pesados.

En la Figura 29 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre el factor lambda para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. Para condiciones de baja revoluciones (1000-1500 rpm) y (2500-3000 rpm) la condición de operación fue mezcla pobre (factor lambda > 1) indicando de que la presencia de aire es excesiva y menor cantidad de gasolina. Para valores intermedios de revolución (1500-2500 rpm) la condición de operación fue mezcla rica (factor lambda < 1) indicando presencia insuficiente de aire o mayor cantidad de gasolina.

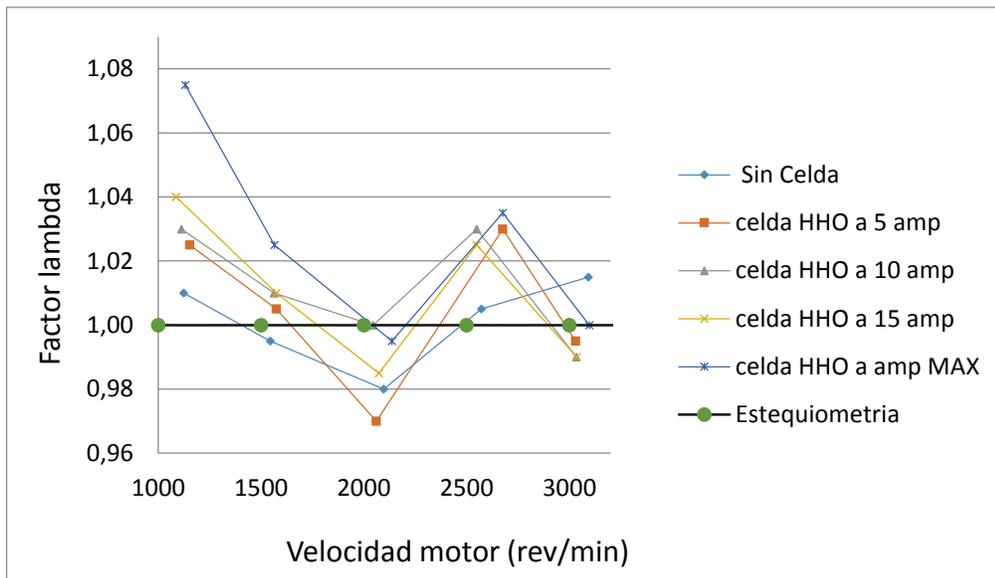


Figura 29 Factor lambda con gasolina- HHO al 40% NaOH

En la Figura 26 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre la concentración de monóxido de carbono para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. La mezcla de gasolina-HHO a 22 amperios presentó una reducción del 99% en emisiones a bajas revoluciones (1000 rpm) y del 59% a velocidad crucero (2500 rpm).

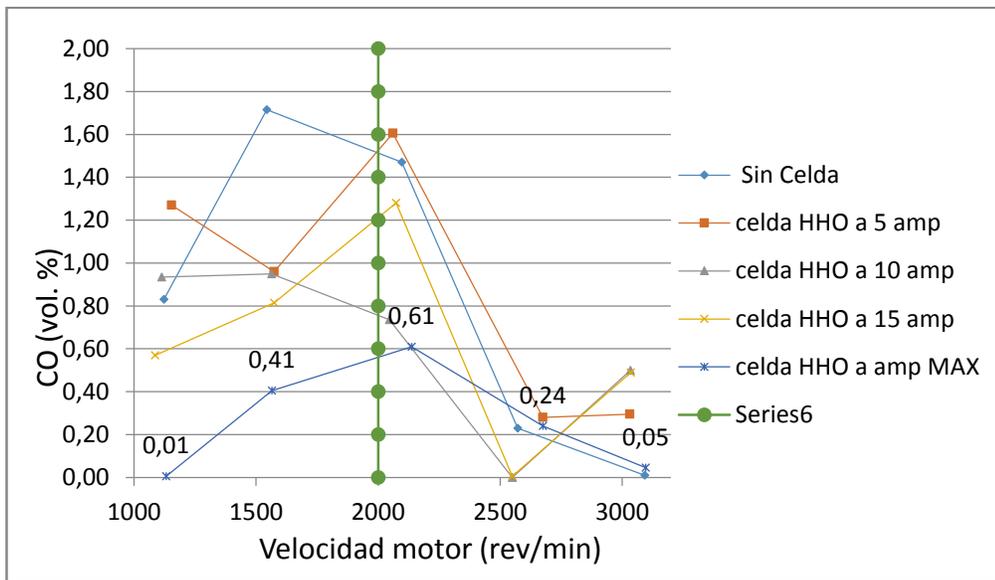


Figura 26 Emisiones de monóxido de carbono con gasolina- HHO al 40% NaOH

En la Figura 38 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre la concentración de hidrocarburos pesados para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. La mezcla de gasolina-HHO a 22 amperios presento una reducción del 93% en emisiones a bajas revoluciones (1000 rpm), del 48% a velocidad crucero (2500 rpm) y del 50% a altas revoluciones (3000 rpm).

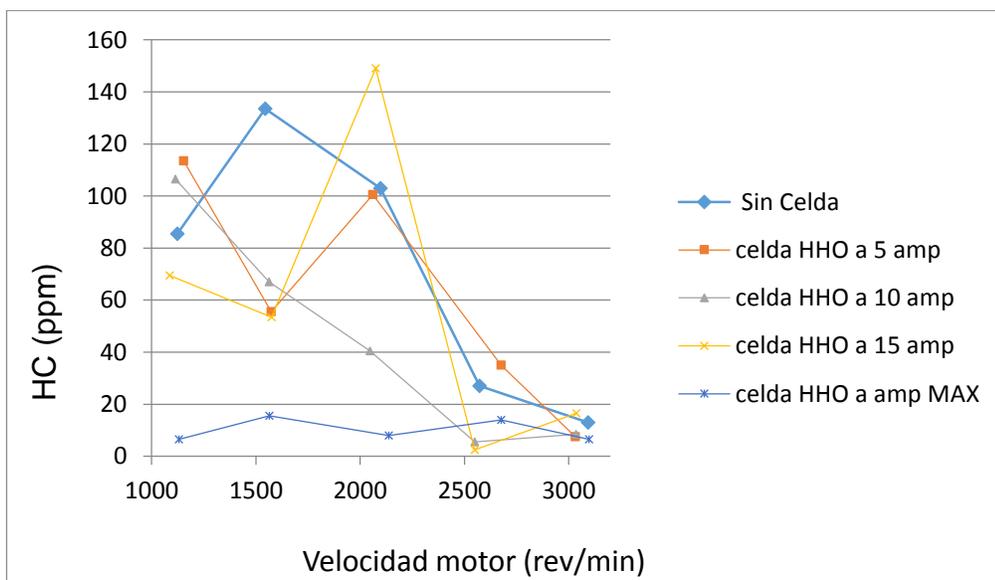


Figura 38 Emisiones de hidrocarburos pesados con gasolina- HHO al 40% NaOH

En la Figura 39 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre el factor lambda para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a GNV y con la mezcla dual gasolina-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. Para todas las condiciones de revoluciones (1000-3000 rpm) la condición de operación fue mezcla pobre (factor lambda > 1) indicando de que la presencia de aire es excesiva y menor cantidad de GNV.

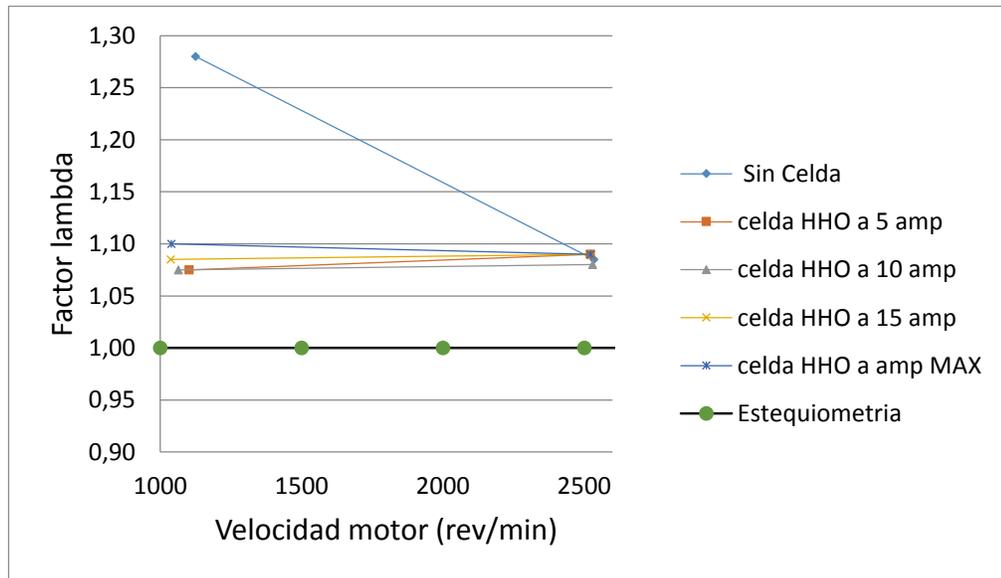


Figura 39 Factor lambda con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

En la Figura 40 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre la concentración de monóxido de carbono para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a GNV y con la mezcla dual GNV-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. La mezcla de GNV-HHO a 22 amperios no presento una reducción en emisiones a altas revoluciones (2500 rpm) y del 97 % a bajas revoluciones (1000 rpm).

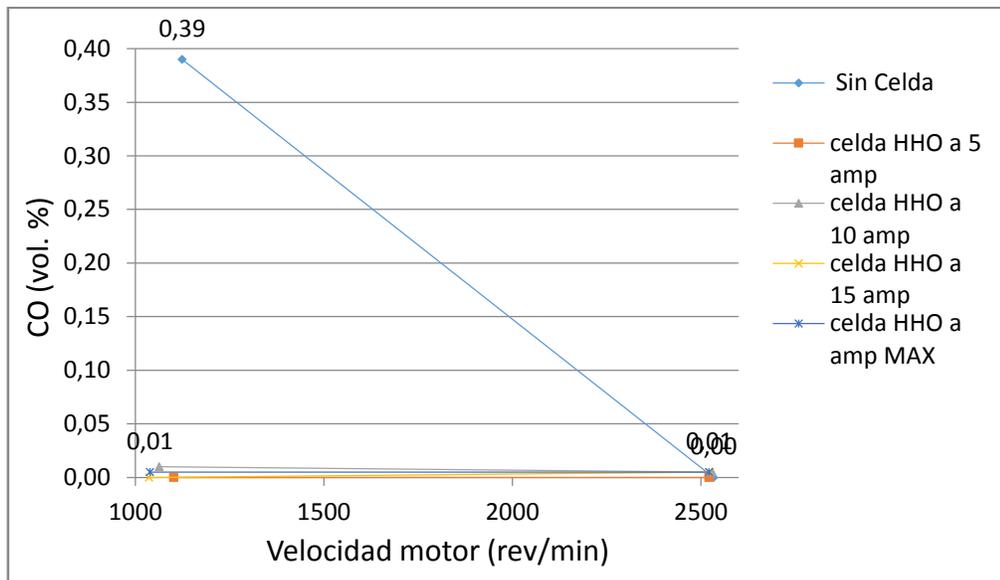


Figura 40 Emisiones de monóxido de carbono con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

En la Figura 41 se muestra el efecto de la adición del gas HHO en la mezcla aire/ combustible sobre la concentración de hidrocarburos pesados para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a GNV y con la mezcla dual GNV-HHO a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda. La mezcla de GNV-HHO a 22 amperios presento una reducción del 17% en emisiones a bajas revoluciones (1000 rpm) y del 10% a velocidad crucero (2500 rpm).

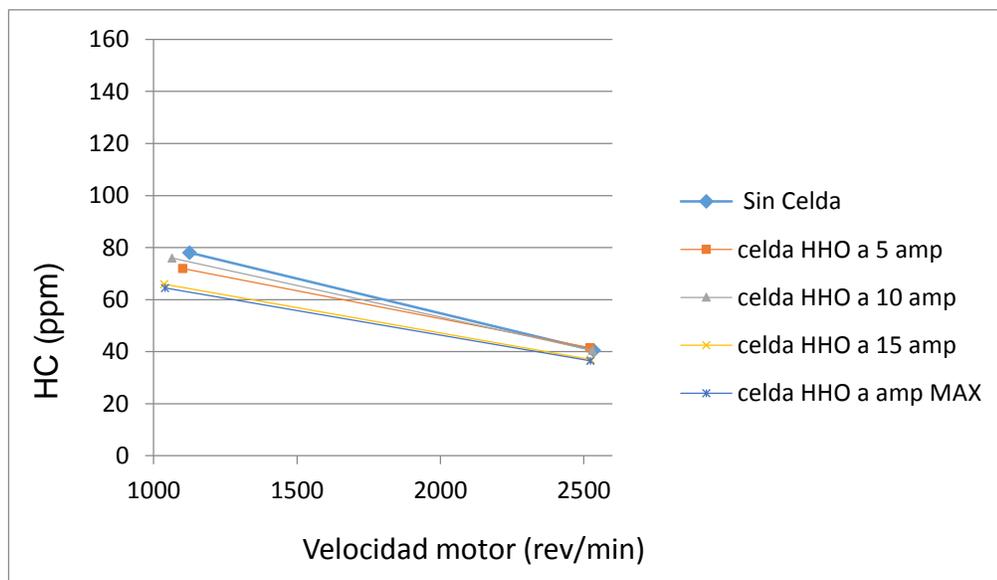


Figura 41 Emisiones de hidrocarburos pesados con gas natural vehicular - HHO al 40% NaOH

## 11. CONCLUSIONES

- Se validó la funcionalidad en la integración de tecnologías de celdas de electrólisis alcalinas en sistemas de generación de potencia convencionales.
- Se generaron procedimientos estandarizados para la instrumentación de motor de combustión, procedimiento para montajes, manipulación de equipos, corrección de errores, adquisición de datos, seguridad en laboratorio y desarrollo de las pruebas experimentales.
- Los resultados experimentales muestran que la adición de gas HHO en la mezcla aire/combustible en un motor Chevrolet Aveo 1600cc genera una reducción en el consumo de combustible del 10% a altas revoluciones (3000 rpm) y un aumento en el consumo de combustible (gasolina) del 8% para bajas revoluciones (1000 rpm) y de un 33% para velocidad crucero (2500rpm).
- Para el funcionamiento con GNV se presentó una reducción en consumo de combustible (GNV) del 43% para todas las condiciones de pruebas.
- Para el funcionamiento a gasolina+ HHO se obtuvieron reducciones en un 99% en la concentración de emisiones de monóxido de carbono a bajas revoluciones y de un 59% a velocidad crucero.
- Para el funcionamiento a gasolina+ HHO se obtuvieron reducciones en un 93% en la concentración de emisiones de hidrocarburos pesados a bajas revoluciones, del 48% a velocidad crucero y de un 50% a altas revoluciones.

## 12. RECOMENDACIONES

- Los trabajos desarrollados en el presente proyecto demostraron la necesidad de realizar las pruebas 1000-300 rpm empleando celdas de electrolisis alcalinas generadoras de solo hidrógeno, para evaluar la reducción en consumo de combustible operando con la mezcla dual gasolina+hidrógeno.
- Se deben incluir las pruebas de gas natural vehicular a diferentes condiciones de operación empleando gas hidrógeno.
- Se debe definir nuevas variables para el trazado de graficas de porcentaje de oxígeno vs factor lambda.
- Se debe hacer mantenimiento a motor y celda de electrolisis para garantizar condición estándar antes de la ejecución experimental.
- Se debe ejecutar una mayor cantidad de experimentos, para evaluar la influencia del electrolito usado en las celdas de electrólisis en el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

### 13. REFERENCIAS

- [1] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, and CANCELLERÍA, *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. 2016.
- [2] I. E. Agency, “Energy production,” p. 2011, Dec. 2011.
- [3] I. E. del G. I. de E. sobre el C. C. IPCC, *Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. 2011.
- [4] I. E. Agency, “Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power.”
- [5] M. M. El-Kassaby, Y. A. Eldrainy, M. E. Khidr, and K. I. Khidr, “Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 243–251, 2016.
- [6] P. Chaiwongsa, N. Pornsuwancharoen, and P. P. Yupapin, “Effective hydrogen generator testing for on-site small engine,” *Phys. Procedia*, vol. 2, no. 1, pp. 93–100, 2009.
- [7] M. del Medio Ambiente de Colombia, “EVALUACIÓN DEL PROGRAMA DE CONVERSIÓN A GNV DE VEHÍCULOS DE LA FLOTA DE EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLÍN,” 2001.
- [8] J. A. Caton, “Implications of fuel selection for an SI engine: Results from the first and second laws of thermodynamics,” *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3157–3166, 2010.
- [9] M. B. King, “Water electrolyzers and the zero-point energy,” *Phys. Procedia*, vol. 20, pp. 435–445, 2011.
- [10] S. A. Musmar and A. A. Al-Rousan, “Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines,” *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3066–3070, 2011.
- [11] A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, “Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11366–11372, 2010.
- [12] C. Bae and J. Kim, “Alternative fuels for internal combustion engines,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 3, pp. 3389–3413, 2017.
- [13] L. Yingjian, Q. Qi, H. Xiangzhu, and L. Jiezhi, “Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 6, pp. 25–33, 2014.
- [14] Idae, “Combustibles y vehículos alternativos,” 2005.
- [15] J. Goñi and M. Rojas, “Combustibles alternativos en motores de combustión interna 1,” *Ing. Ind.*, vol. 32, pp. 199–229, 2014.
- [16] C. Bae and J. Kim, “Alternative fuels for internal combustion engines,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 0, pp. 1–25, 2016.
- [17] Grupo Bancolombia, “Gas Natural Vehicular: presente y futuro.” [Online]. Available: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/gas-natural-vehicular->

- presente-futuro. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [18] I. E. Agency, "Energy Technology Perspectives 2012 Pathways to a Clean Energy System Resumen Ejecutivo," 2012.
  - [19] V. Chintala and K. A. Subramanian, "Hydrogen energy share improvement along with NO<sub>x</sub> (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection," *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, no. x, pp. 249–259, 2014.
  - [20] V. S. Yadav, S. L. Soni, and D. Sharma, "Engine performance of optimized hydrogen-fueled direct injection engine," *Energy*, vol. 65, pp. 116–122, 2014.
  - [21] M. Deb, A. Paul, D. Debroy, G. R. K. Sastry, R. S. Panua, and P. K. Bose, "An experimental investigation of performance-emission trade off characteristics of a CI engine using hydrogen as dual fuel," *Energy*, vol. 85, pp. 569–585, 2015.
  - [22] V. Chintala and K. A. Subramanian, "Experimental investigation of autoignition of hydrogen-air charge in a compression ignition engine under dual-fuel mode," *Energy*, vol. 138, pp. 197–209, 2017.
  - [23] H. M. Cho and B. Q. He, "Spark ignition natural gas engines-A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 2, pp. 608–618, 2007.
  - [24] A. H. Kakaee and A. Paykani, "Research and development of natural-gas fueled engines in Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 805–821, 2013.
  - [25] M. Ozcanli, M. A. Akar, A. Calik, and H. Serin, "Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 36, pp. 23366–23372, 2017.
  - [26] C. Tecnova, "Análisis de libre operación celdas de hidrógeno para mejorar la eficiencia del combustible power hho," 2013.
  - [27] G. Javier, S. Carlos, H. B. Alonso, M. Carlos, and T. Gonzalo, "Oxidación de H<sub>2</sub> y CO en una celda de combustible con ánodo de platino-estaño Oxidation of H<sub>2</sub> and CO in a fuel cell with a Platinum-tin Anode," *Ing. e Investig.*, vol. 24, no. 2, pp. 35–40, 2004.
  - [28] C. Monsalve and B. Hoyos, "Evaluación de una celda de combustible de electrolito polimérico con ánodo de Pt-Sn operando con H<sub>2</sub>, mezcla H<sub>2</sub>-CO, propano y metano," *Energética*, vol. 34, pp. 11–14, 2005.
  - [29] A. Ignacio and B. Arce, "tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico," 2011.
  - [30] T. Rajasekaran, K. Duraiswamy, M. Bharathiraja, and S. Poovaragavan, "Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 46–51, 2015.

- [31] gasNatural fenosa, "Proceso de instalación GNV — Gas Natural Fenosa." [Online]. Available: <http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/gas+natural+vehicular++gnv/instala+gas+natural+vehicular+/1297278295105/proceso+de+instalacion+gnv.html>. [Accessed: 16-Oct-2017].
- [32] Ø. Ulleberg, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 21–33, 2003.
- [33] "Review of water electrolysis technologies and design of renewable hydrogen production systems."
- [34] A. Manabe, M. Kashiwase, T. Hashimoto, T. Hayashida, A. Kato, K. Hirao, I. Shimomura, and I. Nagashima, "Basic study of alkaline water electrolysis," *Electrochim. Acta*, 2013.
- [35] R. Bhandari, C. A. Trudewind, and P. Zapp, "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review," *Journal of Cleaner Production*. 2014.
- [36] General Motors Company, "Technical Data Sheet Chevrolet Aveo," pp. 6–7, 2013.
- [37] A.-H. Kakaee, A. Paykani, and M. Ghajar, "The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 64–78, 2014.