



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**EVALUACIÓN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO ESTACIONARIO
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE
DETERMINANDO SU COMPORTAMIENTO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico Automotriz

AUTOR: JONNATHAN JOSÉ JARAMA MOROCHO

TUTOR: ING. FREDY GONZALO TACURI MOSCOSO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Jonnathan José Jarama Morocho con documento de identificación N° 0106674328, manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo: y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



Jonnathan José Jarama Morocho

0106674328

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jonnathan José Jarama Morocho con documento de identificación N° 0106674328, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: “Evaluación de un motor de encendido provocado estacionario mediante la utilización de hidrógeno como fuente de combustible determinando su comportamiento”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



Jonnathan José Jarama Morocho

0106674328

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso con documento de identificación N° 0103369542, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO ESTACIONARIO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE DETERMINANDO SU COMPORTAMIENTO, realizado por Jonnathan José Jarama Morocho con documento de identificación N° 0106674328, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



Ing. Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso, MSc.

0103369542

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a Dios por haberme guiado y llenado de bendiciones en este duro camino en mi vida personal y académica, a mis padres, Julio Jarama y Sara Morocho, gracias por todo su apoyo, paciencia y esfuerzo que realizaron para que hoy pueda alcanzar una de mis metas tan anheladas.

A mis hermanos y mi cuñada, quienes siempre estuvieron allí brindándome su apoyo de una u otra manera e hicieron esto posible.

Jonnathan José Jarama Morocho

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios y a la virgen por darme la vida y permitirme alcanzar mis metas y estar donde ahora estoy.

A mis padres Julio y Sara, les agradezco mucho por todo el apoyo que siempre ellos me brindaron y el esfuerzo que hicieron para que yo pueda terminar mi carrera.

De igual forma agradezco a mi tutor Ing. Fredy Tacuri por ayudarme y apoyarme en realizar este proyecto para poder culminar una gran etapa de mi vida.

Jonnathan José Jarama morocho

RESUMEN

La investigación desarrollada en este trabajo de titulación está enfocada en la evaluación de un motor de encendido provocado estacionario mediante el uso de una celda de hidrógeno como fuente de alimentación de combustible determinando el comportamiento de las emisiones, con la finalidad de analizar sus variables de contaminación tales como el HC, CO, CO₂, O₂, λ , en base a distintos valores de amperaje suministrado a la celda.

El capítulo uno se formaliza un estudio bibliográfico acerca del motor de combustión interna analizando su funcionamiento y algunos de sus parámetros importantes, así como también las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del hidrógeno de igual forma se analizaron los métodos de producción, almacenamiento, su proceso de combustión y aplicaciones.

En el capítulo dos procedimos a desarrollar las respectivas pruebas de funcionamiento del motor estacionario, en donde se miden las emisiones utilizando como principal combustible la gasolina. Luego se miden las emisiones utilizando la gasolina más el hidrógeno con distintos niveles de corriente con la finalidad de recolectar 10 muestras para su respectivo análisis.

Finalmente, en el capítulo tres al realizar las respectivas pruebas de las emisiones se procede a hacer el análisis estadístico descriptivo de cada una de las pruebas con el fin de visualizar el comportamiento de las variables de estudio.

Palabras claves: Motor, Hidrógeno, Análisis

ABSTRACT

The research developed in this degree work is focused on the Evaluation of a Stationary spark ignition engine, through the use of a hydrogen cell as a source of fuel supply, determining the behavior of the emissions, with the purpose of analyzing its variables of contamination such as HC, CO, CO₂, O₂, λ , based on different values of amperage supplied to the cell.

Chapter one formalizes a bibliographic study about the internal combustion engine, analyzing its operation and some of its important parameters, as well as the physical, chemical and thermodynamic properties of hydrogen, in the same way, the methods of production, storage, its combustion process and applications were analyzed.

In chapter two we proceeded to develop the respective operational tests of the stationary engine, where emissions are measured using gasoline as the main fuel. Emissions are then measured using gasoline plus hydrogen with different current levels in order to collect 10 samples for their respective analysis.

Finally, in chapter three, when carrying out the respective emissions tests, we proceed to make the descriptive statistical analysis of each one of the tests in order to visualize the behavior of the study variables.

Keywords: Engine, Hydrogen, Analysis

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCION	1
PROBLEMA	2
Antecedentes.....	3
Importancia y Alcance.....	4
Delimitación del problema	5
OBJETIVOS.....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos:.....	6
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
1.1 Motores de combustión interna de 4 tiempos.....	7
1.2 Combustible.....	7
1.2.1 Parámetros de los combustibles	8
1.2.2 Poder calorífico Pc	8
1.3 Hidrógeno	9
1.4 Características del hidrógeno	9

1.5	Propiedades térmicas del hidrógeno	9
1.5.1	Poder Calorífico del hidrógeno,	10
1.5.2	Punto de fusión bajo	10
1.5.3	Densidad del hidrogeno (ρ)	11
1.6	Métodos para la producción de hidrógeno	12
1.7	Reformado	12
1.8	Electrolysis	13
1.9	Usos del hidrógeno	13
1.10	Proceso de combustión de un motor MEP alternativo	14
1.11	Emisión de Gases.....	14
1.12	Aplicaciones del H₂ en motores de encendido provocado y resultados .	15
1.13	Potencia en motores utilizando hidrógeno.....	18
1.14	Comparación del rendimiento de un motor utilizando gasolina e H₂...	19
1.15	Consumo de combustible.....	19
1.16	Situación actual en el desarrollo de los motores de hidrógeno	20
1.17	Estadística descriptiva	21
1.18	Media.....	21
1.19	Desviación estándar	22
1.20	Error estándar de la media	22

**CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL
MOTOR MEP ESTACIONARIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA CELDA DE
HIDRÓGENO DE TIPO SECA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS**

23

2.1	Maquinaria/Equipos Utilizados	23
2.2	Motor estacionario	24
2.3	Celda de hidrógeno	25
2.4	Cargador de baterías	26
2.5	Batería plomo – acido	27
2.6	Analizador de gases.....	28
2.7	Mano de obra/Competencias del personal.....	29
2.8	Materiales – insumos utilizados	31
2.9	Características del hidróxido de sodio	31
2.10	Características del agua destilada	31
2.11	Características de los elementos utilizados para la preparación del electrolito	

32

2.12	Medio ambiente	33
2.13	Metodología	33
2.14	Proceso de la toma de datos	33
2.15	Preparación del electrolito	34
2.15.1	Diseño de la matriz para registro de datos	35

2.15.2	Instalación de equipos de prueba y medición.....	36
2.15.3	Determinación del tipo de pruebas para la toma de datos.....	37
2.15.4	Determinación del número de muestras	38
	Estimación del costo energético	38
	Estimación costos por uso de laboratorios.....	39
	Estimación costos por insumos	40
2.16	Proceso de medición de las emisiones con suministro de H₂.....	40
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE		
ESTADÍSTICA DETERMINANDO EL COMPORTAMIENTO DEL MEP.....		43
3.1	Análisis estadístico descriptivo	43
3.1.1.	Análisis estadístico descriptivo para la prueba 1.....	43
3.1.2.	Análisis estadístico descriptivo para la prueba 2	45
3.1.3.	Análisis estadístico descriptivo para la prueba 3	46
3.2.	Análisis comparativo.....	48
CONCLUSIONES.....		56
RECOMENDACIONES		58
ANEXOS.....		1
BIBLIOGRAFIA.....		32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación universidad politécnica salesiana	5
Figura 2 Fases de motor de 4 tiempos.....	7
Figura 3 Producción de hidrógeno	12
Figura 4 Electrolizador.....	13
Figura 5 Sistemas de suministro de hidrógeno	18
Figura 6 Motor estacionario	24
Figura 7 Celda de hidrógeno.....	25
Figura 8 Cargador de baterías	27
Figura 9 Batería de ácido-plomo.....	28
Figura 10 Analizador de gases Maha MGT 5	29
Figura 11 Proceso de preparación del electrolito.....	34
Figura 12 Preparación del electrolito	35
Figura 13 Instalación de los equipos de prueba	37
Figura 14 Proceso de medición de emisiones	41
Figura 15 Equipos e instalación para el desarrollo de las pruebas.....	42
Figura 16 T de muestra de emisiones a 36 A	44
Figura 17 T de muestra de emisiones a 61 A	46
Figura 18 T de muestra de emisiones a 66 A	47
Figura 19 Análisis del promedio de HC.....	48
Figura 20 Análisis del promedio del CO	49
Figura 21 Análisis del promedio del CO ₂	50
Figura 22 Análisis del promedio del O ₂	51

Figura 23 Análisis del promedio de lambda	52
Figura 24 Corridas experimentales del HC	53
Figura 25 Corridas experimentales del CO	53
Figura 26 Corridas experimentales del CO2	54
Figura 27 Corridas experimentales del O2	54
Figura 28 Corridas experimentales de lambda	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades térmicas del hidrógeno.....	10
Tabla 2 Propiedades físicas del hidrógeno.....	10
Tabla 3 Propiedades químicas del hidrógeno.....	11
Tabla 4 Diferencia de consumo.....	20
Tabla 5 Diferencias de rendimiento	21
Tabla 6 Características técnicas del motor estacionario.....	24
Tabla 7 Sistemas y elementos de la celda de hidrógeno	25
Tabla 8 Datos técnicos del cargador de baterías	27
Tabla 9 Datos técnicos de la batería plomo-acido.....	28
Tabla 10 Características técnicas del analizador de gases Maha MGT 5.	29
Tabla 11 Competencias del personal para el desarrollo del estudio.	30
Tabla 12 Características del hidróxido de sodio	31
Tabla 13 Características del agua destilada.....	32
Tabla 14 Características de los elementos utilizados	32
Tabla 15 Condiciones ambientales.....	33
Tabla 16 Matriz de registro de datos	35
Tabla 17 Estimación del costo energético.....	38

INTRODUCCION

El proyecto desarrollado sobre la “Evaluación de un motor de encendido provocado estacionario mediante la utilización de hidrógeno como fuente de combustible determinando su comportamiento” proporciona una información acerca de un análisis estadístico descriptivo de las variables de emisiones contaminantes tales como HC, CO, CO₂, O₂, λ. esta investigación cuenta con varios procesos de estudio.

- Proceso de la toma de datos.
- Proceso de medición de las emisiones con suministro de hidrógeno.

Se realiza varias pruebas de estudio con la utilización de la celda de hidrógeno con varios niveles de amperaje, una vez que registrado los datos se realiza el análisis respectivo para determinar el comportamiento de las emisiones.

PROBLEMA

El informe y datos de la Organización Mundial de la Salud establece que la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo (OMS, 2021). Según estimaciones actuales, la contaminación atmosférica en las ciudades de todo el mundo se calcula que cada año la exposición a la contaminación del aire causa 7 millones de muertes prematuras; esta mortalidad se debe a la exposición a materia particulada de 2,5 micrones o menos de diámetro (CO₂ 14% - H₂O 13% - N₂ 71% / NO_x, HC, CO 1-2 %), que puede causar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer. (OMS, 2021). Los gases emitidos por los autos que son el monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar y óxido de nitrógeno han sido el blanco de las reglamentaciones sobre emisiones de escapes en todo el mundo a causa de su potencial peligro para la salud y que afectan directamente al medioambiente debido a que emiten gases de efecto invernadero el cual contribuye al calentamiento global. (Parker, 2001).

Antecedentes

El motor de combustión interna se caracteriza por su actividad en el transporte público y privado, sin embargo, el uso de combustibles va de la mano con el incremento de las emisiones a nivel mundial e incluso aparece el aporte de los procesos industriales a nivel mundial (Gavilanes & Pérez, 2022).

En Ecuador, el transporte es parte del 49 % del consumo energético total y que representa el 25 % de las denominadas emisiones de gases de efecto invernadero nativas de la combustión de la gasolina. En este sentido, es válido el desarrollo de un análisis energético sobre el motor de combustión interna en función de las gasolinas comercializadas en el país y de las condiciones geográficas que inciden en el desempeño de los motores, esto con el fin de disminuir las emisiones de los gases de combustión y la optimización de los combustibles (Escobar, 2022).

A nivel del transporte es importante disponer de una efectiva gestión sobre la demanda con el fin de controlar la frecuencia y la distancia de recorrido, de manera similar, es importante conocer de aspectos operativos que se reflejan en el consumo de aire y combustible. De manera general, se conoce que el motor de combustión interna (MCI) es una planta de energía eficiente en el sector de transporte e incluso con fines operativos, sin embargo, se estima que los motores MCI sean relevantes hasta que exista una escasez de combustible, sea de impacto el desarrollo de tecnologías menos contaminantes y que, las regulaciones de las entidades de control ambiental se tornen inalcanzables para los fabricantes (Eguez, 2021).

En el criterio de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) la contaminación del aire es un riesgo medioambiental de incidencia en la salud del ser humano y este particular incide en países desarrollados y en naciones que se encuentran en vías de desarrollo. Se estima que la contaminación atmosférica mundial genera 7 millones de muertes; la mencionada mortalidad es

genera por el nivel de exposición al material particulado de 2,5 micrones o de menor diámetro que causa enfermedades cardiovasculares y de índole respiratoria.

En función del incremento de la contaminación y por la creciente concientización del ser humano, ha surgido como alternativa los motores eléctricos. Sin embargo, los denominados motores de encendido provocado aumentan su uso por las exigencias nativas en las emisiones establecidas por los entes de control sumado a la escasa infraestructura para la carga de vehículos eléctricos.

Importancia y Alcance

La presente investigación se enfoca sobre en evaluar el desempeño de un motor de encendido provocado de tipo estacionario mediante el uso del hidrógeno como una fuente de energía. Es importante tener presente que, la época actual requiere de una especial atención sobre la contaminación ambiental que sufre el planeta por el uso indiscriminado de combustibles derivados del petróleo, lo cual, se incrementa anualmente y es un factor que motiva el incremento de los gases de efecto invernadero y el incremento de temperatura en el planeta tierra.

Con esta investigación, se persigue disponer de datos reales que son parte del funcionamiento de un motor estacionario y que, en base al uso de hidrógeno, se establezcan los parámetros que inciden de manera directa en el control de las emisiones del proceso de combustión interna de la fuente.

Un aspecto a tomar en cuenta en los índices de contaminación ambiental es el efecto de la innovación tecnológica, por lo tanto, el uso de un combustible alternativo como el hidrógeno motiva el control de la reducción sobre las emisiones nocivas que sufre el ambiente e impulsa una mejora en la calidad de vida de las personas.

Delimitación del problema

El presente proyecto, se llevará a cabo en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca ubicado en la provincia del Azuay de la ciudad de Cuenca.

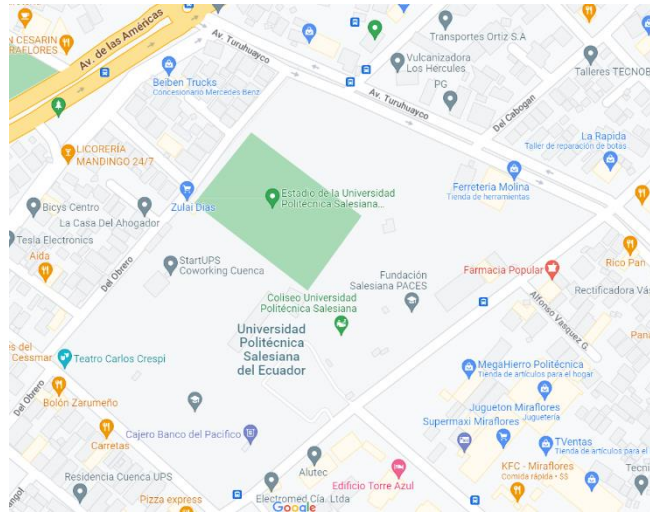


Figura 1 Ubicación universidad politécnica salesiana

Fuente: Google maps

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar un motor de encendido provocado estacionario mediante la utilización de hidrógeno como fuente de combustible determinando su comportamiento.

Objetivos específicos:

- Revisar el estado del arte mediante investigación bibliográfica sobre el uso de hidrógeno como fuente de combustible conociendo los resultados en diferentes aplicaciones.
- Desarrollar pruebas de funcionamiento del motor MEP estacionario mediante la aplicación de la celda de hidrógeno tipo seca para la obtención de los resultados.
- Analizar los resultados obtenidos mediante estadística determinando el comportamiento del MEP.

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El fundamento teórico de la investigación se soporta en el contenido significativo sobre el tema de interés con lo cual, se tiene:

1.1 Motores de combustión interna de 4 tiempos

Se denomina motores de 4 tiempos a aquellos motores térmicos cuyo ciclo de trabajo está compuesto por cuatro etapas que son: Admisión, compresión, expansión y escape.

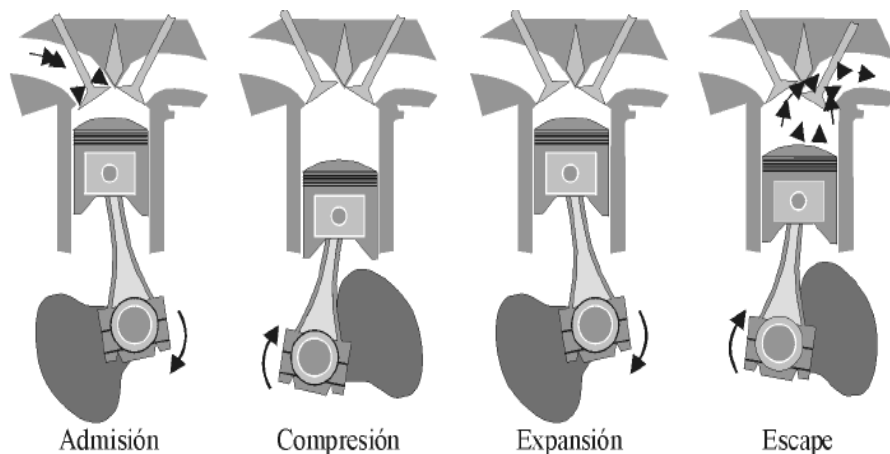


Figura 2 Fases de motor de 4 tiempos

Fuente: (Desantes, 2011)

En consecuencia, un ciclo de trabajo abarca dos vueltas completas de cigüeñal en donde cada 180° de giro de este comprenderá una de las fases del ciclo de trabajo.

1.2 Combustible

Varios de los motores de 4 tiempos utilizan un combustible de origen fósiles, principalmente de los derivados del petróleo.

Su facilidad almacenamiento en el ambiente con su gran densidad energética hacen que los motores brinden una gran autonomía y su alimentación sea sencilla. (Desantes, 2011).

1.2.1 Parámetros de los combustibles

En los combustibles existen varios parámetros que son muy importantes y que se debe tener muy en cuenta a la hora de utilizarlos.

1.2.2 Poder calorífico Pc

Se le define como el contenido energético el combustible liberado en forma de calor en la combustión, en la cual los productos quemados se mantienen en las mismas condiciones de temperatura y presión.

Tener en cuenta que para los combustibles que contienen hidrógeno, el producto final será el agua, por lo que la energía total que liberara durante la combustión real variara si el agua está en estado gaseoso o líquido. (Desantes, 2011).

Por lo tanto, existen dos valores para el poder calorífico que son:

- Poder calorífico superior (PCS).

Este poder calorífico se obtiene cuando los productos están en condiciones estándar, porque el agua de los productos se ha condensado y se ha liberado su calor de vaporización.

- Poder calorífico inferior (PCI).

Este poder calorífico obtendríamos si el agua de los productos permaneciera en la fase gaseosa.

La mayoría de las maquinas térmicas, incluido los motores de combustión interna alternativos, solo se puede utilizar el poder calorífico inferior, debido a que los productos de la combustión se descargan a altas temperaturas en la fase gaseosa durante el proceso de escape. (Desantes, 2011).

1.3 Hidrógeno

Es el elemento químico cuya representación se determina por la letra H y con número atómico de la unidad. De manera general, es un elemento abundante en el universo y es capaz de ser utilizado como combustible y suministro en la industria química. En condición normal de presión y temperatura se lo considera como un gas de naturaleza diatómica (H_2) con características de incoloro, inodoro, insípido y de alta inflamabilidad. Para el hidrogeno, se determina una gran masa atómica (g/mol) de 1,00794, además, es conocido que este elemento es parte del 75% de la materia visible en el universo (Escobar, 2022).

1.4 Características del hidrógeno

En lo que tiene que ver con las propiedades del hidrógeno y en función a su potencial uso como combustibles, se determinan las siguientes (Escobar, 2022):

- Reservas ilimitadas.
- Combustión completa.
- Induce un bajo nivel de contaminantes atmosféricos.
- Diversa gama de inflamabilidad.
- Elevada temperatura de auto ignición.
- Baja densidad.
- Elevada velocidad de llama.

1.5 Propiedades térmicas del hidrógeno

El hidrógeno al ser un elemento muy abundante en nuestro planeta tierra posee características muy importantes que son:

1.5.1 Poder Calorífico del hidrógeno,

El valor más importante es el poder calorífico que posee el hidrógeno, esto se debe a que a mayor poder calorífico se genera una mayor fuerza en la cámara de combustión, obteniendo un mayor toque y potencia. El hidrógeno al ser parte de un proceso de combustión con el oxígeno genera como resultado calor y agua. Las propiedades térmicas, físicas y químicas se determinan en base a los parámetros que son parte del contenido de las Tablas 1, 2 y 3 indicadas (Eguez, 2021).

Tabla 1 Propiedades térmicas del hidrógeno

Temperatura	Densidad	Calor específico cp	Poder calorífico	Numero prandt	de	Conductividad térmica “K”
°K	$\rho(\text{kg/m}^3)$	KJ/Kg °C	KJ/g	Pr		W/m ⁰ C
30	0,84722	10,84	141,9	0,759		0,0228

Fuente: (Eguez, 2021)

1.5.2 Punto de fusión bajo

El hidrógeno dispone de propiedades únicas como el punto de fusión bajo y que alcanza los -259 °C, su presentación en el universo es en fase líquida, sólida y gaseosa, sin embargo, para el caso presente, el hidrógeno como combustible es de forma gaseosa. (Eguez, 2021).

La Tabla 2, determina las propiedades de índole física que son parte del hidrógeno con sus correspondientes unidades de medida, en este caso, se debe tener presente que cada unidad depende de la propiedad del elemento en análisis.

Tabla 2 Propiedades físicas del hidrógeno

PROPIEDAD	VALOR
-----------	-------

Incoloro, inodoro y poco soluble con disolventes	
Energía de ionización	1310Kj mol-1
Estado líquido por debajo de su punto de ebullición	-252.77 °C
Estado sólido por debajo de su punto de fusión	-259.2 °C
Peso	14 veces menor que el aire
Temperatura de auto ignición	585 °C
Límite de ignición	4 -75% en volumen

Fuente: (Eguez, 2021)

1.5.3 Densidad del hidrogeno (ρ)

La densidad del hidrógeno es la masa por unidad de volumen de fluido, en la cual para el hidrogeno es un elemento muy ligero que tiene una densidad de 0.0899 kg/m³ (gas). (Eguez, 2021).

La Tabla 3, establece las propiedades químicas del hidrógeno con sus correspondientes unidades de medida, en este sentido, se tiene presente que cada unidad depende de la propiedad del elemento en análisis.

Tabla 3 Propiedades químicas del hidrógeno

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	273 (Kg/L)
Coefficiente de difusión en aire	0,61 (cm ² /s)
Coefficiente de difusión en aire	0,61 (cm ² /s)
Propagación de llama en aire	2,65 (m/s)
Octanaje	130

Fuente: (Eguez, 2021)

Por otro lado, es un combustible de densidad baja de energía por unidad de volumen, en este caso, un litro de gasolina alcanza los 700 gramos mientras que 1 litro de hidrógeno licuado es

aproximadamente 71 gramos, de todas maneras, al ser comprimido a una presión de 350 atmosferas su peso es de 30 gramos. (Eguez, 2021).

1.6 Métodos para la producción de hidrógeno

La seguridad en el uso de vehículos de hidrógeno se vincula a la seguridad de sus componentes, sin embargo, necesita de un manejo adecuado. Los tanques de almacenamiento del hidrógeno están diseñados para garantizar la seguridad del vehículo.

La producción de hidrógeno para su uso como combustible alternativo dispone de múltiples métodos, entre los cuales, se tiene (Fernandez P. , 2022):

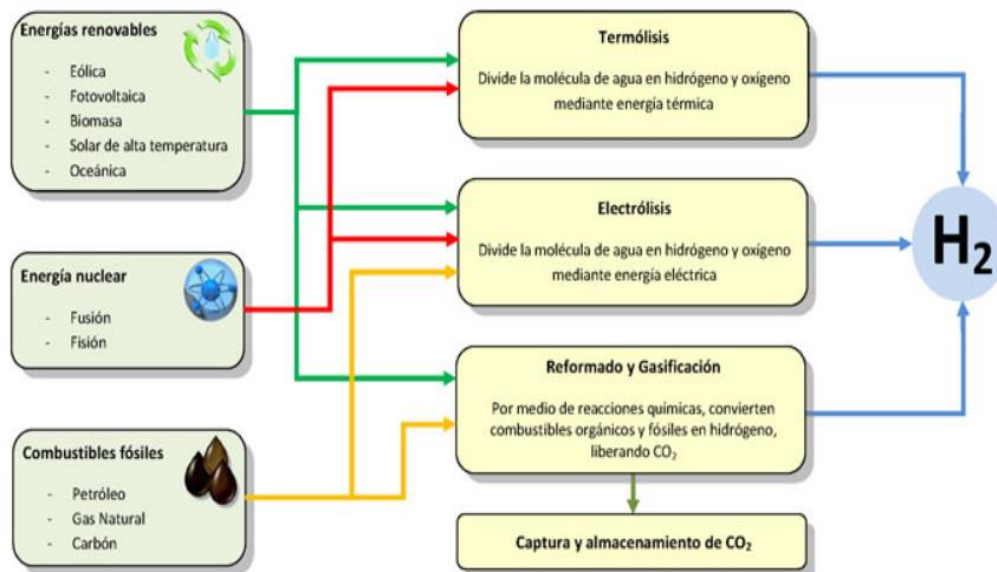
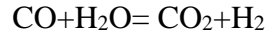


Figura 3 Producción de hidrógeno

Fuente: Energías Renovables

1.7 Reformado

Este método, conocido como reformado con vapor de agua del gas natural, requiere la combinación de metano con vapor de agua para producir dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno a través de una reacción química de naturaleza endotérmica. Para este proceso se requieren temperaturas de 760 a 815,556 °C de acuerdo a las siguientes reacciones:



1.8 Electrolysis

Un segundo método es la electrólisis del agua, que utiliza electricidad para separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Actualmente, este enfoque mejora la electrólisis y reduce el valor de la energía eléctrica renovable.

La finalidad de la producción de hidrógeno se basa en la electrólisis por medio de electricidad renovable, por lo tanto, el hidrógeno está libre de emisiones en su uso y en la producción.

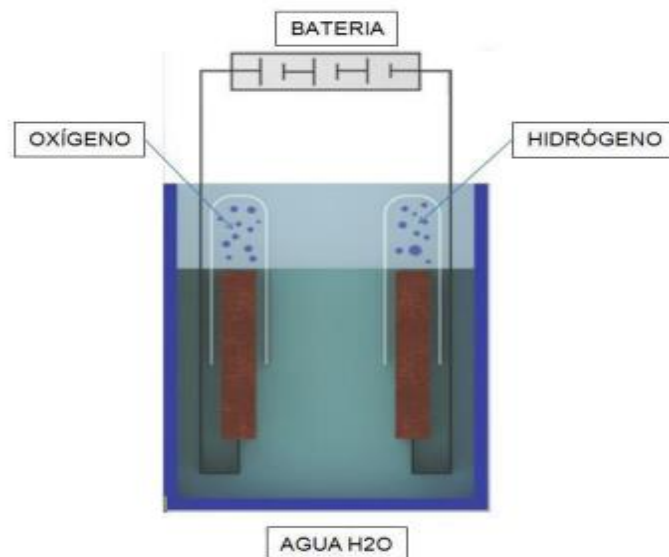


Figura 4 Electrolizador

Fuente: Velásquez y Quiceño

1.9 Usos del hidrógeno

La utilidad del hidrógeno como combustible alternativo facilita la denominada des carbonización del principal sector contaminante que es el transporte, por ende, se identifica como un combustible relevante en barcos, aviones, trenes, submarinos, entre otros. Incluso es una alternativa del gas natural. La diferencia relevante en el uso del hidrógeno es que al ser parte de

un proceso de combustión no genera el anhídrido carbónico sino más bien, el resultado es el agua como residuo, dicho de otra manera, a nivel industrial se lo considera como una fuente de calor de elevada temperatura (Herranz, 2021).

El hidrógeno es útil para des carbonizar los sectores de mayor contaminación e impulsar el uso de la energía renovable que paulatinamente son de conocimiento y que elevan su nivel competitivo, sin embargo, su principal desventaja es su necesidad de ser gestionadas a nivel mundial (Herranz, 2021).

1.10 Proceso de combustión de un motor MEP alternativo

En la combustión de los hidrocarburos es necesario considerar la existencia de oxígeno disponible, con lo cual, el carbono y el hidrógeno son parte de un proceso de oxidación que genera el CO₂ y H₂O. Por lo tanto, la unidad de masa (mol) del hidrocarburo formado por carbono e hidrógeno se expresa como una reacción en base a la siguiente ecuación:



Se debe tener en cuenta que el combustible a utilizar es el hidrógeno H₂, de tal forma que, utilizando una composición simple en el aire libre de humedad se determina la siguiente ecuación:



1.11 Emisión de Gases

El proceso de combustión interna establece emisiones contaminantes para el medio ambiente, las cuales, se reflejan en los diversos contenidos de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), Oxígeno (O₂), hidrocarburos no combustionados (HC), nitrógeno, agua y la presencia de los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Arrojo, 2015).

Un adecuado análisis sobre las diversas mezclas de los gases es un sustento del diagnóstico de funcionamiento de un motor. En este sentido, la existencia del denominado analizador de gases

permite el establecimiento de la composición química de los gases, sin embargo, el proceso analítico se reduce a la ecuación estequiométrica de (Eguez, 2021):



Para Arrojo (2015; Pardo, 2019) el hidrógeno es una fuente de energía que reduce las emisiones contaminantes pues es libre de carbono dentro de su composición, por esta razón, la innovación de la tecnología se orienta a la obtención de hidrógeno para establecer un menor costo energético y la disminución de las emisiones. A partir de la década del 70, se confirmó el uso del hidrógeno en el motor de combustión interna siempre y cuando, se disponga de sustanciales modificaciones en las condiciones de operación. Se tiene presente que el uso directo de hidrógeno causa emisiones de NO_x elevadas en relación a las nativas del uso de gasolina, además, genera en la combustión la denominada detonación. En este sentido, se requiere una mezcla pobre o incluso, instalar un sistema de dilución térmica, lo cual, incrementa los efectos de pérdida de potencia.

1.12 Aplicaciones del H₂ en motores de encendido provocado y resultados

A partir de la década del 70, se confirmó el uso del hidrógeno en los motores de combustión interna. La diversidad de los estudios muestra la aplicación directa del hidrógeno en motores en base a modificaciones que permitan disponer de combustibles tradicionales en similares condiciones de operación. Por otra parte, el uso directo del hidrógeno provoca un incremento de emisiones de NO_x respecto a las obtenidas en el proceso de combustión de la gasolina. Además, se provoca en el proceso de combustión la detonación y el retorno de llama por la menor energía de ignición (Herranz, 2021).

En los últimos años, existe una disminución de reservas fósiles, además, se produce un aumento de la demanda energética, por lo que, es relevante la explotación de fuentes alternativas

de energía. Por otra parte, la preocupación por el tema ambiental ha llevado a los gobiernos a disponer de acuerdos para la protección medioambiental y la consecuente generación de políticas que fortalezcan el desarrollo de tecnologías para la reducción de emisiones (Hidrógeno, 2021).

El hidrógeno se caracteriza por las propiedades óptimas como fuente de energía y, además, constituye un combustible idóneo para la reducción de las emisiones contaminantes debido a la ausencia de carbono en su composición. En los últimos años se han aplicado acciones que sustentan el desarrollo tecnológico para el uso del hidrógeno como combustible en el sector energético y de transporte. Complementariamente, las tecnologías necesarias para la generación de hidrógeno de fuentes renovables contribuyen a un menor costo energético y al consecuente ahorro de las emisiones (García, 2020).

Las mezclas de hidrógeno y metano motivan el estudio de gases ricos en hidrógeno resultantes de procesos catalíticos de gases nativos de la gasificación de biomasa. El uso de catalizadores en el procesamiento de gases de biomasa mejora las propiedades del combustible y disminuye la proporción de los gases inertes, con lo cual, se aumenta el poder calorífico de una mezcla. En la última década se desarrollan proyectos de descomposición catalítica de gas natural y biogás, de esa manera, se obtienen mezclas con propiedades aceptables en los combustibles (CAR-TEC, 2022).

En el ámbito de las investigaciones, es necesario la selección y transformación del motor que permita el desarrollo de ensayos, así mismo, disponer de la infraestructura pertinente para el correcto suministro de combustibles gaseosos y las medidas que garanticen la seguridad de la instalación. Bajo este lineamiento, es significativo el conjunto de mediciones y consecuente comparación de los parámetros que son parte del funcionamiento del motor, entre las cuales, se establece el rendimiento, la composición de las emisiones y el análisis de la combustión con

combustibles gaseosos en relación a la combustión del motor con gasolina en similares condiciones de funcionamiento. Las variaciones que se obtienen en los resultados de los ensayos de procesos de combustión son función de la incidencia del tipo de combustible, por lo tanto, es factible la generación de conclusiones en el uso de las mezclas como potenciales combustibles a sustituir (Hidrógeno, 2021).

A nivel de los fabricantes de vehículos de transporte pesado se plantea el empleo de hidrógeno como una potencial alternativa sobre el diésel considerando un tiempo de transición hasta que la pila de combustible o las baterías electroquímicas sean el medio de sustitución definitiva. En este sentido, las tecnologías de propulsión deben evaluar las ventajas y desventajas que generan el uso del hidrógeno, en especial sobre el control de las emisiones.

A nivel de ventajas, se determina que la pila de combustible se ubica en pleno desarrollo. Además, el motor de combustión interna de hidrógeno constituye una opción que genera rentabilidad para el transporte sin emisiones de CO₂, además que su implementación es relativamente rápida con la infraestructura actual. En base a que el hidrógeno se considera un combustible neutro en carbono, se tiene que la combustión genera cantidades reducidas de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y partículas. Sin embargo, el principal elemento de los gases de escape es el óxido de nitrógeno (NO_x). Se debe considerar que la velocidad laminar de combustión y los límites de ignición permiten que el hidrógeno genere una combustión pobre y con la presencia de aire en exceso (Zorrero, 2022).

El nivel de temperatura de los gases de escape se considera como baja y es un factor que contribuye a la reducción de las emisiones de NO_x. En consecuencia, la combustión es pobre y la consecuente eficiencia se refleja en la reducción de los consumos respecto a los motores de combustión (García, 2020).

1.13 Potencia en motores utilizando hidrógeno

La potencia de un motor obtenida mediante la utilización de hidrógeno como combustible alternativo dependerá siempre de la relación aire/combustible y del sistema de inyección de combustible utilizado en el motor.

Dado que en el método de inyección en el conducto de admisión mezclan aire y el combustible antes de que entren en la cámara de combustión, estos sistemas limitaran la potencia teórica máxima obtenible a aproximadamente un 85% de la obtenida en los motores de gasolina.

Para los sistemas de inyección directa que mezclan el combustible con el aire después de que la válvula de admisión se haya cerrado, la potencia máxima a la salida del motor puede ser aproximadamente un 15% mayor que la de los motores de gasolina. (Jose J. de Troya Calatayud).

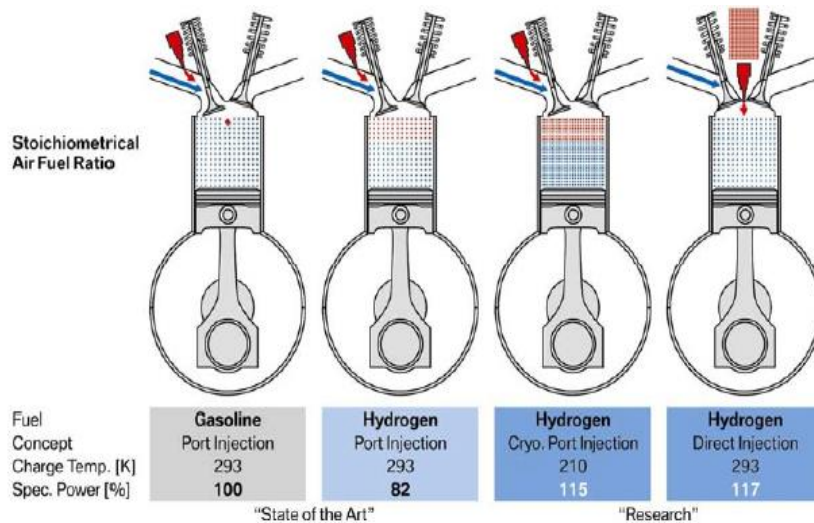


Figura 5 Sistemas de suministro de hidrógeno

Fuente: (Jose J. de Troya Calatayud)

Para (Jose J. de Troya Calatayud). Los motores de hidrógeno están diseñados para funcionar con dos veces más el aire del teóricamente requerido para producir una combustión completa. Con esta relación la formación de NOx, se reduce casi a cero.

1.14 Comparación del rendimiento de un motor utilizando gasolina e H₂

Según (Velastegui, s.f.) existe un incremento de potencia y torque al hacer uso de gasolina mezclado con hidrógeno el cual aumenta el rendimiento del motor y a su vez existe también una disminución en las emisiones contaminantes como el CO, O₂, Hc, NO.

En la tabla 5 se observa los valores comparativos de torque, potencia y emisiones.

Tabla 4 Comparación del rendimiento del motor

Combustible	Gasolina	Gasolina + hidrógeno
Potencia [HP]	96,37	98,99
Torque [Nm]	124,6	138,5
CO (%)	0,89	0,82
O ₂ (%)	3,35	1,36
HC (pmm)	379,6	210,6
NO (ppm)	185,3	190,3

Fuente: (Velastegui, s.f.)

1.15 Consumo de combustible

El consumo de combustible del motor alternativo se utiliza para identificar el tipo de combustible que consume más rápido. Según (Pardo, 2019). El motor consume 0,51 L de gasolina en 60 segundos, y el consumo aproximado de hidrógeno es de 0,61 L en 60 segundos y 1,19 L en 120 segundos. Para determinar el consumo de combustible de un motor se utiliza un medidor de flujo la cual nos ayudara a calcular la cantidad de combustible consumido en litro por minuto.

Es necesario el uso de dos medidores de flujo, un medidor para analizar el consumo de gasolina por presentarse en estado líquido y otro medidor para analizar el consumo de hidrógeno por presentarse en forma de gas.

En el análisis del consumo de gasolina se utiliza el medidor de la marca ZJ-LCD-M, mientras que para medir el consumo del hidrógeno se utiliza el equipo Gas Alert Max XTII.

En la siguiente tabla 4 se puede observar las diferentes medidas para cada combustible:

Tabla 5 Diferencia de consumo

Tipo de combustible	Tiempo (s)	Consumo (l/min)
Gasolina	60	0,51
Hidrógeno	60	0,60
Gasolina	120	1,03
Hidrógeno	120	1,19
Gasolina	180	1,55
Hidrógeno	240	1,79
Gasolina	240	2,36
Hidrógeno	300	2,58
Gasolina	300	2,96

Fuente: (Pardo, 2019)

1.16 Situación actual en el desarrollo de los motores de hidrógeno

Para (Jose J. de Troya Calatayud). Las investigaciones se centran principalmente en el del transporte terrestre, destacando las investigaciones de BMW en su serie 7.

En 2000, BMW lanzó el modelo de 750 hL, el primer automóvil del mundo propulsado por hidrógeno producido en serie. El coche está equipado con un motor bivalente de doce cilindros propulsado por hidrógeno y gasolina. Gracias a sus depósitos criogénicos para almacenar hidrógeno con una capacidad de 140 litros, tiene una autonomía aproximada de 350 kilómetros.

(Jose J. de Troya Calatayud).

En la tabla 5 se puede ver la diferencia de rendimiento del modelo mencionado en comparación con su contraparte de gasolina.

Tabla 6 Diferencias de rendimiento

MOTOR	BMW 750IL	BMW 750 hL	BMW HYDROGEN 7
Combustible	Gasolina súper	hidrógeno	hidrógeno
Numero de disposición de cilindros	12 en V	12 en V	12 en V
Válvulas por cilindro	2	2	
Cilindrada (cm ³)	5.379	5.379	5.972
Potencia máxima (CV/rpm)	243/5000	204	260/5100
RENDIMIENTO			
Velocidad máxima (km/h)	250	226	
Aceleración 0-100 km/h (segundos)	6,8	9,6	9,5
Aceleración 0-100 m (segundos)	26,7	26,1	

Fuente: (Jose J. de Troya Calatayud)

1.17 Estadística descriptiva

El análisis descriptiva se refiere a la investigación y análisis de los datos obtenidos en una muestra (n) y como su nombre lo indica describe y resume las observaciones, para obtener información sobre un fenómeno un suceso o un hecho. (Cebrian, s.f.).

Según (Fernandez, Sanchez, & Largo, 2002) la estadística descriptiva desarrolla un conjunto de técnicas cuyo propósito es presentar las diferencias observadas en los datos.

1.18 Media

La media es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos, calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número total de valores. (Lopez, 2018).

$$Media = \frac{\sum_1^N X1}{N} = \frac{x1 + x2 + x3 \dots + xn}{N}$$

Donde x es el valor de observación i , y N el número total de observaciones.

1.19 Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de dispersión de los datos, cuanto mayor es la dispersión, mayor es la desviación estándar, si no existiera ningún cambio o variación de datos es decir si todos los datos fueran iguales, la desviación estándar será cero. (Abraira, 2002).

$$S = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{n - 1}$$

Donde:

S: desviación estándar.

X: cada valor.

Σ : Suma de.

\bar{x} : Media aritmética.

1.20 Error estándar de la media

El error estándar es una forma de medir cuan precisa es nuestra estimación de la media. Cuando calculamos la media de una muestra dada, en realidad no queremos conocer la media de esa muestra en particular, sino la medida de la población más grande de la que proviene la muestra. Si bien, usamos muestras porque es más fácil recopilar datos que una población completa, la media de la muestra variara de una muestra a otra, por lo que se usa el error estándar de la media. (Statologos, 2021). La fórmula para calcular el error estándar es la siguiente:

$$\text{Error estandar} = s/\sqrt{n}$$

Donde:

- **s:** es la desviación estándar de la muestra.
- **n:** es el tamaño de la muestra.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR MEP ESTACIONARIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA CELDA DE HIDRÓGENO DE TIPO SECA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS

Para asegurar el correcto desarrollo del estudio, se aplica la metodología de mejoramiento continuo basado en las 5 M, ya que esta permite reducir los costes y aumentar la eficiencia en la producción, ya sea de bienes o para el desarrollo de un experimento. El método de las 5 M es un sistema de análisis estructurado que tiene cinco pilares fundamentales, alrededor de los cuales giran las posibles causas de un problema. Este método consiste en las siguientes etapas:

- Maquinaria (machine).
- Mano de obra (manpower).
- Material (material).
- Medio ambiente (middle).
- Método (method).

A continuación, se describen cada una de estas etapas para la aplicación de la presente investigación.

2.1 Maquinaria/Equipos Utilizados

Dentro de la maquinaria o equipo para el desarrollo de esta investigación se emplea lo siguiente:

- Motor estacionario.
- Celda de hidrógeno.
- Cargador de baterías.
- Batería plomo – ácido.
- Analizador de gases.

A continuación se describen las características técnicas de los equipos.

2.2 Motor estacionario

El motor estacionario utilizado en esta investigación es un motor de encendido provocado de alimentación natural que se utiliza para el accionamiento de una bomba de agua. En la figura 6 se observa el motor estacionario y en la tabla 6 se describen las características técnicas.



Figura 6 Motor estacionario

Fuente: Autor

Tabla 7 Características técnicas del motor estacionario

Característica	Dato
Tipo de motor	OVH a 4 tiempos
Marca	Truper
Modelo	MOBO-2
Potencia nominal del motor	5.5 HP (4,101W)
Cilindrada del motor	163cm ³ (ml)
Tipo de carburante	Gasolina
Tipo de aceite a utilizar	SAE 10W-30
Capacidad del tanque	3.6 L
Duración tanque con 100% de carga	1 hora
Nivel sonoro	Menor a 98 db a 4m
Velocidad sin carga	3650 – 3700 rpm

Peso	23kg
Aspiración	Atmosférico
Sistema de alimentación de combustible	Carburador

Fuente: Autor

2.3 Celda de hidrógeno

La celda de hidrógeno de tipo seca ver figura 7 está constituida de dos sistemas, el primer sistema es la celda seca y el segundo sistema es el circuito de gas. El generador cuenta con varios elementos los cuales se encuentran detallados en la siguiente tabla 7.

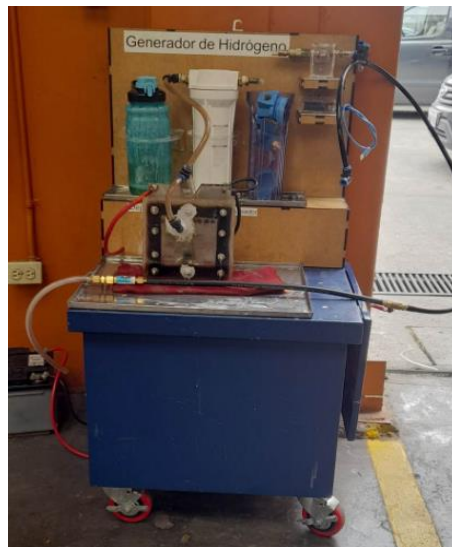


Figura 7 Celda de hidrógeno

Fuente: Autor

Tabla 8 Sistemas y elementos de la celda de hidrógeno

Sistema	Elemento	Característica	Cantidad
Generador	Laterales	Placas de acrílico	2
		Espesor : 6mm	1
	Electrodos positivos	Acero Inox 316L 3mm	2
	Electrodos negativos	3mm	
	Electrodos neutros	Acero Inox 316L	6

		Espesor: 3mm	
	Juntas	Goma EPDM	10
		Espesor: 3mm	
	Elementos de sujeción: pernos, tuercas, y arandelas		10
		Acero Inox	
Circuito de gas	Burbujeador	Capacidad de 2L	1
	Depósito de electrolito	Capacidad de 2L	1
	Manguera	Transparentes	1 m
		Negra	1 m
Racor en L	Reforzadas		
	Racor instantáneo		
	Forma L		
	Para tubos de 1/2in		3
	Termo deformable		
	Racor instantáneo		
Racor en T	Forma T		
	Para tubo de 12mm termo deformable		1

Fuente: Autor

2.4 Cargador de baterías

El cargador de baterías es un dispositivo que sirve para suministrar corriente continua a las baterías de ácido-plomo de los vehículos mediante los polos positivo y negativo. Este tipo de cargadores de baterías tiene diferentes amperajes de carga.

En la figura 8 se puede observar un cargador de baterías de marca truper que se utilizara para las mediciones, en la tabla 8, se describen sus características técnicas.



Figura 8 Cargador de baterías

Fuente: Autor

Tabla 9 Datos técnicos del cargador de baterías

Característica	Dato
Marca	Truper
Voltaje/ frecuencia de entrada	120 Vca / 60Hz
CCA	Amperaje en frio
Corriente de entrada	1.2 / 4.3 / 12.8 / 30 A
Corriente de salida	2 / 20 continuos
140 A intermitentes	3 seg. max. encendido / 360 seg. min. apagado
Voltaje de salida	12 Vcc
RC	Capacidad de reversa
Peso	13.2 kg
Ancho	25.5 cm
Altura	62.5 cm

Fuente: Autor

2.5 Batería plomo – acido

Para el funcionamiento del generador se necesita de una fuente de alimentación, para lo cual se utiliza una batería de 12 Volts.

En la figura 9 se puede ver la batería que se utilizara para las mediciones. Esta batería ayuda a suministrar energía necesaria para el funcionamiento del generador y a su vez producir hidrógeno, en la tabla 9, se describen sus características técnicas.



Figura 9 Batería de ácido-plomo

Fuente: Autor

Tabla 10 Datos técnicos de la batería plomo-acido

Característica	Dato
Marca	Bosch
Modelo	S3 Full Equipo 42
Voltaje	12
Capacidad (Ah)	45
CCA-18°C(A)	370
CCA-0°C(A)	440
CCA-27°C(A)	520

Fuente: Autor

2.6 Analizador de gases

Para la medición de las emisiones de los gases de escape se utiliza el equipo Maha MGT 5, versión V0.31/4.00, como se puede ver en la figura 10. Y en la tabla 10, se describen todas sus características técnicas.



Figura 10 Analizador de gases Maha MGT 5

Fuente: (Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co, 2007)

Tabla 11 Características técnicas del analizador de gases Maha MGT 5.

Equipo	Cantidad	Características
Maha MGT 5, versión V0.31/4.00.E	1	<p>Analizador 4/5 gases. - WgB39 / Lg4601</p> <p>Número de serie año de fabricación. 4213/534772 02/2009</p> <p>Identificación de modelo. - analizador de 5 gases MGT 5</p> <p>Gases analizables. - CO, CO₂, HC, O₂, NO_x.</p> <p>Alimentación de corriente. - 85 V – 280 – VAC, 50/60 Hz, 65 W.</p> <p>Temperatura de trabajo. - 5 a 45 °C.</p> <p>Interface. - LON, USB, OBD.</p> <p>Cantidad total de flujo. - 3.5 l/min</p> <p>Dimensiones. - 560x240x300 mm.</p> <p>Presión de trabajo. - 750 – 1100 mbar.</p> <p>Calibración. - cada 6 meses.</p> <p>Tipo de precisión.- OIML R99: 0, PTB-A18.10:1</p>

Fuente: (Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co, 2007)

2.7 Mano de obra/Competencias del personal

Para el desarrollo de este estudio se requiere del uso de equipos, métodos técnicos y científicos; para la obtención de los datos que se utilizan para evaluar el comportamiento del motor.

En la tabla 11, se detallan las competencias que debe tener el personal.

Tabla 12 Competencias del personal para el desarrollo del estudio.

	Metodologías	Competencias
Proceso de toma de datos	Preparación del electrolito	Conocimientos en manejo de insumos y utensilios de laboratorios químicos.
	Diseño de una matriz para toma de datos	Conocimientos de ofimática
	Instalación y uso de equipos de medición	Conocimientos en la operación de equipos tales como motores, analizador de gases
	Determinación del tipo de pruebas	Conocimiento de normativas sobre emisiones contaminantes
	Proceso de aplicación de pruebas	Conocimientos en la operación de equipos tales como motores, analizador de gases etc.
Métodos estadísticos para el análisis de resultados	Análisis de datos por estadística descriptiva (graficas, media aritmética, coeficiente de variación y desviación estándar muestral).	Conocimientos sobre estadística descriptiva.

Fuente: Autor

2.8 Materiales – insumos utilizados

Los materiales a utilizar para la producción del electrolito son los siguientes:

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Agua destilada
- Jarra de 1 litro
- Guantes
- Gafas de protección
- Mandil u overol

En las tablas 12, 13, 14 se describen las siguientes características de cada uno de los insumos.

2.9 Características del hidróxido de sodio

En la tabla 12 se detallan las características del hidróxido de sodio.

Tabla 13 Características del hidróxido de sodio

Propiedad	Valor
Formula molecular	NaOH
Peso molecular (g/mol)	40.0
Estado físico	Solido
Punto de fusión (°C)	318; puro
Presión de vapor (mmHg)	0; puro
Gravedad especifica (Agua=1)	2,13; puro
PH	14; solución 5%

Fuente: (Yumpu, s.f.)

2.10 Características del agua destilada

En la tabla13 se detallan todas las características del agua destilada.

Tabla 14 Características del agua destilada

Propiedad	Valor
PH	5 y 8
Conductividad eléctrica	Max, $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 298 K (25°C) <3
Resistividad eléctrica	Min, $\text{M}\cdot\text{cm}$ a 298 K (25°C) 4.0
Potencial de hidrógeno	Ph. A 298 K (25°C) 5-8
Carbono orgánico total	(TOC), max, $\mu\text{g}/\text{L}$ 200
Sodio	Max, $\mu\text{g}/\text{L}$ 10
Cloruros	Max, $\mu\text{g}/\text{L}$ 10
Silice	Max, $\mu\text{g}/\text{L}$ 500

Fuente: (Ecopura, s.f.)

2.11 Características de los elementos utilizados para la preparación del electrolito

En la siguiente tabla 14 se describen las características de cada uno de los elementos utilizados para la preparación del electrolito.

Tabla 15 Características de los elementos utilizados

Elemento	Característica
Jarra	- Material: Plástico - Capacidad 1 L
Paleta	- Material: Plástico - Resistente al agua
Guantes	- Material: Látex - Altamente sensitivo
Gafas	- Material: Fibra de vidrio o mica - Resistente a altas temperaturas
Mandil	- Material: Gabardina-100% algodón - Anti fluido, repelente al cloro

Fuente: Autor

2.12 Medio ambiente

Las pruebas se desarrollan en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca ubicado en la ciudad de Cuenca que tiene las condiciones ambientales indicadas en la tabla 15.

Tabla 16 Condiciones ambientales

Condición ambiental	Valor	Unidad
Ubicación geográfica	Latitud: 2° 59' 10" S Longitud: 79° 00' 41" W	
Altura geográfica	2558	msnm
Presión atmosférica	74140	Pa
Temperatura promedio	14,7	°C
Humedad relativa	77	%
Promedio anual de lluvias	878	mm

Fuente: (Estación Climatológica Cuenca, 2016)

2.13 Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se aplica la metodología experimental basado en los siguientes procesos:

2.14 Proceso de la toma de datos

Para el desarrollo de la toma de datos se han establecido los siguientes aspectos:

- Preparación del electrolito.
- Diseño de una matriz para registro de datos.
- Instalación de equipos de prueba.
- Determinación de los tipos de pruebas que se desarrollara.
- Proceso de aplicación para las pruebas.

2.15 Preparación del electrolito

A continuación, se describe el proceso para la preparación del electrolito:

1. En un envase o jarra verter 1 Litro de agua destilada.
2. Añadir 50g de hidróxido de sodio NaOH en el recipiente con agua destilada.
3. Mezclar poco a poco hasta que el hidróxido de sodio NaOH se diluya por completo y almacenar el electrolito.

En la figura 11 se indica el diagrama de flujo del proceso de preparación del electrolito.

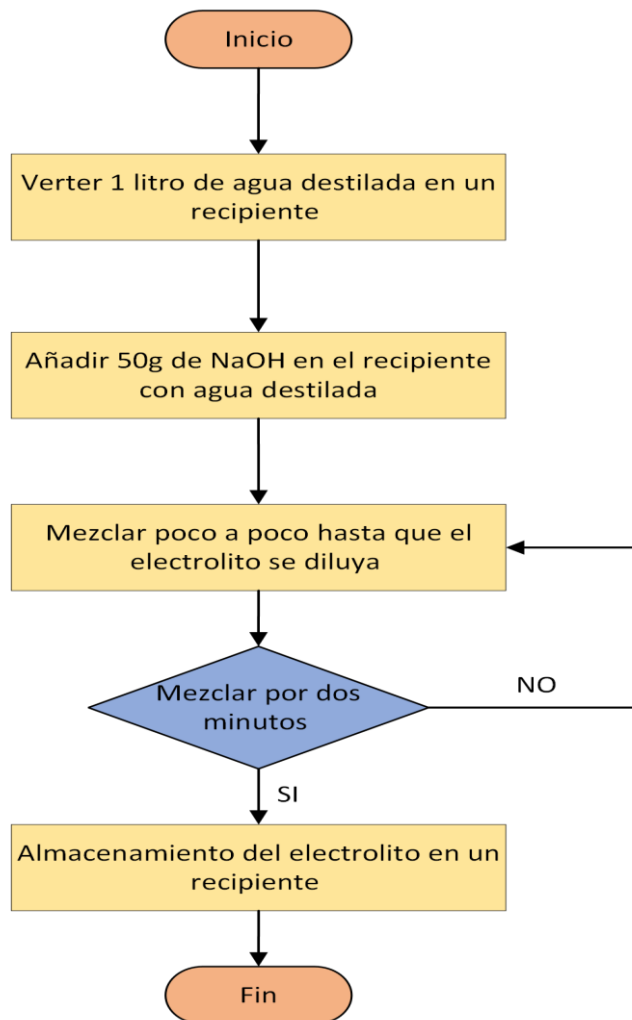


Figura 11 Proceso de preparación del electrolito

Fuente: Autor

En la figura 12 se observa la preparación del electrolito.



Figura 12 Preparación del electrolito

Fuente: Autor

2.15.1 Diseño de la matriz para registro de datos

Para el registro de los datos de cada una de las pruebas de emisiones se utiliza la siguiente matriz experimental.

En la primera fila se anotan las variables sobre emisiones que se analizarán en este estudio, HC, CO, CO₂, λ , y en las columnas se especifica el número de corridas experimentales.

En la tabla 16 se observar el diseño de la matriz.

Tabla 17 Matriz de registro de datos-prueba 1 a 36 amperios

Número de corridas experimentales	HC ppm	CO %	CO ₂ %	O ₂ %	λ
1	376	3,74	7,25	8,29	1,277
2	359	3,63	7,38	8,66	1,280

3	378	3,93	7,73	7,41	1,198
4	316	4,28	8,27	6,57	1,164
5	372	4,18	8,02	6,47	1,149
6	374	4,14	7,96	8,03	1,188
7	383	4,12	8,02	6,53	1,156
8	366	4,16	7,78	6,71	1,189
9	298	4,07	7,77	7,13	1,194
10	348	3,98	7,75	7,13	1,189

Fuente: Autor

2.15.2 Instalación de equipos de prueba y medición

Para la instalación de los equipos se aplica el siguiente proceso:

1. Encender el motor durante 5 minutos hasta que alcance la temperatura de funcionamiento.
2. Encender la celda de hidrógeno verificando los niveles de electrolito en el depósito y burbujeador.
3. Encender el analizador de gases para su respectivo calentamiento y estabilizarlo.

En la figura 13 se indica el diagrama de flujo de la instalación de los equipos de prueba y medición.

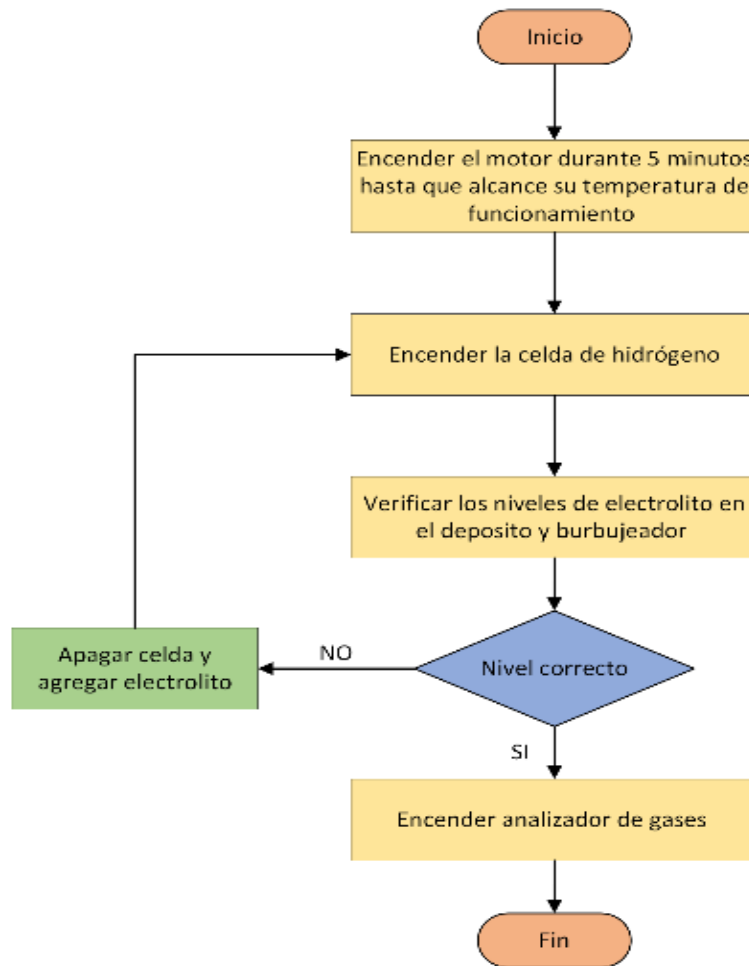


Figura 13 Instalación de los equipos de prueba

Fuente: Autor

2.15.3 Determinación del tipo de pruebas para la toma de datos

Para la toma de datos de las emisiones se establecieron las siguientes mediciones:

- Prueba con gasolina: Medición de emisiones únicamente con gasolina.
- Prueba 1: Medición de emisiones con suministro de H_2 y corriente de alimentación de 36 amperios.
- Prueba 2: Medición de emisiones con suministro de H_2 y corriente de alimentación de 60 amperios.
- Prueba 3: Medición de emisiones con suministro de H_2 y corriente de alimentación de 66 amperios.

2.15.4 Determinación del número de muestras

Se registrará un total de 10 muestras experimentales para la prueba de emisiones con hidrógeno con diferente nivel de amperaje, en tanto que para la prueba con gasolina se registrará únicamente 1 muestra, la que servirá como referencia para el análisis comparativo.

Debido a factores tales como, el tiempo de duración de cada prueba (10 min), disponibilidad de los equipos, disponibilidad de los laboratorios, disponibilidad de los laboratoristas y costos, se ha establecido un total de 10 corridas experimentales para cada prueba con suministro de hidrogeno. A continuación, se desarrolla un cálculo del costo total para el desarrollo de las pruebas.

2.15.4.1 Estimación de costos/pruebas

Para el desarrollo de esta investigación se emplean recursos materiales tales como insumos y equipos, también se emplean recursos humanos entre los que se puede mencionar laboratoristas, docente tutor. A continuación, se realizar una estimación económica sobre el coste de las pruebas realizadas.

- Costos energéticos.
- Costos por uso de laboratorios.
- Costos por insumos.

Estimación del costo energético

En esta investigación se realizan 3 pruebas con 10 corridas experimentales cada una, en la tabla 17 se detallan las variables relacionadas para el cálculo del consumo energético.

Tabla 18 Estimación del costo energético

Denominación	Abreviatura	Valor	Unidad
Volteja de red	V	120	V

Consumo de corriente	I_{P1}	36	A
	I_{P2}	60	A
	I_{P3}	66	A
Tiempo promedio/prueba	t_m	10	min
		0.16	h
Costo del kWh	C_{EL}	9.2	Ctvs./kWh

Fuente: Autor

Calculo de la potencia eléctrica consumida

Potencia eléctrica consumida en la prueba 1 $P_1 = V * I = 120 * 36 = 4.32 \text{ kW}$

Potencia eléctrica consumida en la prueba 2 $P_2 = V * I = 120 * 60 = 7.2 \text{ kW}$

Potencia eléctrica consumida en la prueba 3 $P_3 = V * I = 120 * 66 = 7.92 \text{ kW}$

Potencia total consumida $P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 4.32 + 7.2 + 7.92 = 19.44 \text{ kW}$

Tiempo total $t_T = t_m * \# \text{pruebas} * \# \frac{\text{corridas}}{\text{prueba}} = 0.16 * 3 * 10 = 4.8 \text{ h}$

Costo por gasto de energía $\$_{EL} = P_T * t_T * C_{EL} = 19.44 * 4.48 * 9.2 =$

801.23 ctvs de dolar = 8.01 dolares

Estimación costos por uso de laboratorios

Para el cálculo del costo por uso de laboratorios se estima que en la UPS el costo/hora es de 70 \$, y el costo promedio por hora de un laboratorista es de 5 dólares/hora.

Costo por uso de laboratorios $\$_{ULAB} = \text{costo} \frac{\text{laboratorio}}{\text{hora}} * t_T = 70 * 4.8 =$

336 Dolares

Costo por laboratorista $\$_{LABT} = \text{costo} \frac{\text{laboratorista}}{\text{hora}} * t_T = 5 * 4.8 = 24 \text{ Dolares}$

Costo por laboratorios $\$_{LABTORIOS} = \$_{LABT} + \$_{ULAB} = 336 + 24 = 360 \text{ Dolares}$

Estimación costos por insumos

Como insumos para la preparación del electrolito se utilizan, hidróxido de sodio, agua destilada, gasolina, utilería de laboratorio químico.

$$\text{Costo por uso de hidróxido de sodio } \$_{NaOH} = \text{peso de NaHO} * \frac{\text{Costo}}{\text{gramo}} = 50 * 0.05 = 2.5$$

ctvs = 0.025 dólares

$$\text{Cotos de agua destilada } \$_{\text{agua destilada}} = \# \text{ litros} * \text{costo agua} \frac{\text{destilada}}{\text{litro}} = 4 * 0.625 =$$

2.5 dólares

$$\text{costos por preparación de electrolito } \$_{\text{electrolito}} = \$_{NaOH} + \$_{\text{agua destilada}} = 0.025 +$$

2.5 = 2.52 dólares

$$\text{costos por uso de gasolina } \$_{\text{gasolina}} = \# \text{ galones} * \text{costo} \frac{\text{gasolina}}{\text{garon}} = 1 * 2.4 =$$

2.4 dólares

$$\text{costos total por uso insumos } \$_{\text{insumos}} = \$_{\text{electrolito}} + \$_{\text{gasolina}} = 2.52 + 2.4 =$$

4.92 dólares

COSTO TOTAL DE INSUMO

$$\$_t = \$_{EL} + \$_{LABTORIOS} + \$_{\text{insumos}} = 8.01 + 360 + 4.92 = 372.9 \text{ dólares}$$

2.16 Proceso de medición de las emisiones con suministro de H₂

Para la evaluación de emisiones se aplicará el siguiente proceso:

1. Calentar el motor a temperatura de funcionamiento por 5 minutos.
2. Encender la celda de hidrógeno.
3. Conectar la manguera de suministro de hidrogeno hacia el motor.
4. Acelerar el motor a 2500 rpm y mantener constante durante las pruebas.
5. Abrir la válvula de paso del H₂ hacia el motor.

6. Mantener funcionando el motor con la mezcla durante 1 minuto.
7. Colocar la sonda de medición de emisiones en el conducto de escape durante 30 segundos.
8. Registrar los resultados en la matriz.
9. Para la siguiente prueba retirar la sonda del conducto de escape y esperar que el analizador se estabilice.
10. Para las demás corridas experimentales, aplicar desde el paso 6.

En la figura 14 se indica el diagrama de flujo del proceso para las mediciones de las emisiones.

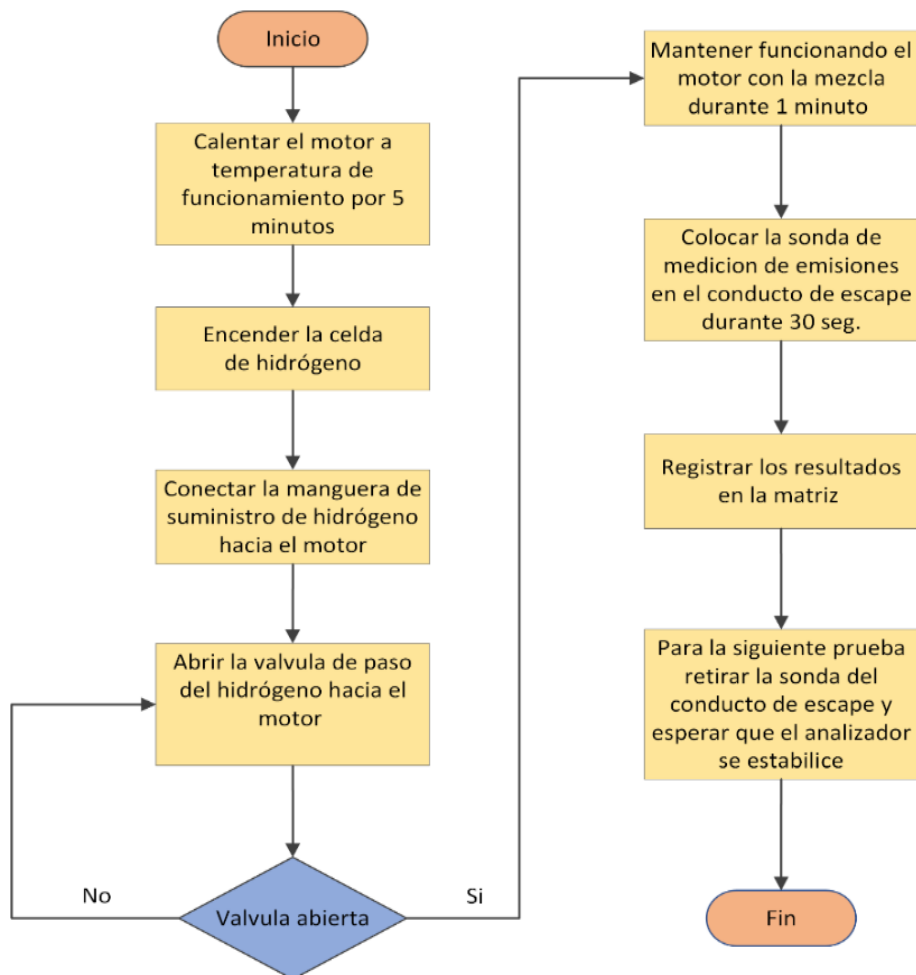


Figura 14 Proceso de medición de emisiones

Fuente: Autor

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTADÍSTICA DETERMINANDO EL COMPORTAMIENTO DEL MEP

Para el análisis de los resultados de esta investigación se utiliza el software Minitab con el que se aplica una estadística descriptiva, en la que se determinan la media, la desviación estándar, el error estadístico de la media y el intervalo de confianza. A continuación, se realiza un análisis comparativo de las emisiones para las diferentes pruebas.

3.1 Análisis estadístico descriptivo

El análisis descriptivo de las variables de estudio HC, CO, CO₂, O₂, LAMBDA, se realiza con la utilización del software Minitab, con el que se determinan la media, la desviación estándar, el error estándar de la media y el intervalo de confianza. A continuación, se presenta los resultados para cada una de las pruebas.

3.1.1. Análisis estadístico descriptivo para la prueba 1

Al realizar el análisis estadístico descriptivo para la prueba 1, se observa que la media del HC es de 356.1 ppm cuya desviación estándar es de 27.99 lo que permite concluir que los datos producto de las mediciones no son tan dispersos, así también el error estándar es de 8.85, valor que indica que los datos tomados entre cada corrida experimental varían mínimamente. Finalmente se observa que el intervalo de confianza presenta valores mínimo y máximo (336,08 y 376,12) los cuales estos no están muy separados.

Como se observa en la figura 16 la media del CO es de 4.0230 y su desviación estándar es de 0,2054 lo que permite deducir que estos datos producto de las pruebas no son tan dispersos, de igual el error estándar es de 0,0650 valor que indica que entre las diferentes corridas existen mínimas variaciones. Los datos tomados en las pruebas son pequeños. Por último el intervalo de confianza se ve también con valores mínimo y máximo y que estos no son muy prolongados. Por otra

parte el valor de la media del CO₂ es de 7.7930, así que su desviación estándar es de 0,3038 lo que permite suponer que los valores tomados de las muestras experimentales no son tan extensos, en su error estándar el valor es de 0,0961 y demuestra que los valores también son pequeños. Además en los valores del intervalo de confianza se observa que no están muy separados. Por otro lado el valor de la media del O₂ es de 7.293 y su desviación estándar es de 0,788 indicando que este dato no es muy inmenso, por otra parte su error estándar demuestra un valor bajo de 0,249, en su intervalo de confianza tiene valores que no están muy separados. Por último el valor de LAMBDA es de 1.1984, y su desviación estándar tiene una muestra de 0,0454 lo que nos permite deducir que el valor no es muy considerable, mientras en su error estándar se puede apreciar un valor insignificante de 0,0144, para concluir el intervalo de confianza se puede evidenciar valores no muy lejanos.

EMISIONES 2A

T de una muestra: HC; CO; CO₂; O₂; λ

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
HC	10	356,10	27,99	8,85	(336,08; 376,12)
CO	10	4,0230	0,2054	0,0650	(3,8760; 4,1700)
CO ₂	10	7,7930	0,3038	0,0961	(7,5757; 8,0103)
O ₂	10	7,293	0,788	0,249	(6,729; 7,857)
λ	10	1,1984	0,0454	0,0144	(1,1659; 1,2309)

μ: media de población de HC; CO; CO₂; O₂; λ

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	HC	CO	CO ₂	O ₂	λ	
1	390	4,99	9,93	3,76	0,985	
2	473	4,79	9,29	4,98	1,014	
3	458	5,34	8,95	5,04	1,030	
4	485	5,78	9,38	3,73	0,956	
5	474	5,73	9,42	3,71	0,960	
6	483	5,63	9,49	3,66	0,956	
7	465	5,53	9,41	5,13	0,993	
8	463	5,28	9,64	3,73	0,972	
9	425	5,25	9,57	4,05	0,992	
10	447	5,12	9,65	3,81	0,983	

Figura 16 T de muestra de emisiones a 36 A

Fuente: Autor

3.1.2. Análisis estadístico descriptivo para la prueba 2

Al realizar el análisis estadístico para la prueba 2 se aprecia los valores de cada una de las variables estudiadas y se entiende que en algunos datos son mayores y otros menores en comparación a los datos de la prueba número 2, en el cual el HC tiene una media de 456,30 ppm, y su desviación estándar es de 29,28 lo que permite verificar que los datos productos de las diferentes mediciones no están muy esparcidos, así mismo el valor del error estándar es de 9,26 valores que siguen variando en lo mínimo, por último se indica que el intervalo de confianza tiene valores mínimo y máximo, pero cabe recalcar que no son muy largos.

Como se ve en la figura 17 la media del CO es de 5,344 y su desviación estándar es de 0,325 lo que permite apreciar que esos datos de las pruebas no son muy separados o discontinuos, por otra parte, el error estándar es de 0,103 dato que nos indica que no está muy enorme, en el intervalo de confianza muestra valores que no están muy separados.

La media del CO₂ es de 9,4730, de modo que su desviación estándar tiene un valor de 0,2582 lo que permite verificar que los datos no están discontinuados, en el error estándar de la media se ve un valor de 0,0817 que es un valor menor al de la prueba 2, por otra parte, el intervalo de confianza tiene una muestra de valores mínimos y máximos que no están muy separados.

En cuanto al valor del O₂ su media es de 4,160 el cual es un dato menor al de la prueba 2, así mismo su desviación estándar es menor al de la prueba 2 con un dato de 0,624, en el error estándar el dato también vario siendo este menor al dato de la prueba 2, en su intervalo de confianza se puede ver que los datos son valores máximos y mínimos.

En los datos de lambda su media es de 0,98410 siendo menor al de la prueba anterior, en el valor de la desviación estándar también su dato resultó menor en comparación con la prueba 2

con un valor de 0,02461, y a su vez el error estándar fue de 0,00778 resultando menor, y por último el intervalo de confianza resultan valores que no varían en exceso.

EMISIONES 20A

T de una muestra: HC; CO; CO₂; O₂; λ

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
HC	10	456,30	29,28	9,26	(435,36; 477,24)
CO	10	5,344	0,325	0,103	(5,111; 5,577)
CO ₂	10	9,4730	0,2582	0,0817	(9,2883; 9,6577)
O ₂	10	4,160	0,624	0,197	(3,714; 4,606)
λ	10	0,98410	0,02461	0,00778	(0,96650; 1,00170)

μ: media de población de HC; CO; CO₂; O₂; λ

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	HC	CO	CO ₂	O ₂	λ		
1	390	4,99	9,93	3,76	0,985		
2	473	4,79	9,29	4,98	1,014		
3	458	5,34	8,95	5,04	1,030		
4	485	5,78	9,38	3,73	0,956		
5	474	5,73	9,42	3,71	0,960		
6	483	5,63	9,49	3,66	0,956		
7	465	5,53	9,41	5,13	0,993		
8	463	5,28	9,64	3,73	0,972		
9	425	5,25	9,57	4,05	0,992		
10	447	5,12	9,65	3,81	0,983		

Figura 17 T de muestra de emisiones a 61 A

Fuente: Autor

3.1.3. Análisis estadístico descriptivo para la prueba 3

Al realizar el análisis estadístico para la prueba 3 se aprecia valores del HC que tiene una media de 407,4, y su desviación estándar de 36,6 lo que permite comprobar que los datos medidos no están siendo muy altos, en su error estándar el valor es de 11,6 el cual podremos fijarnos que mencionado valor es mayor a de las pruebas 2 y 3, pero su intervalo de confianza bajo en comparación con el de la prueba anterior número 2.

Por otra parte, como se observa en la figura 18 la media del CO es de 5,484 y su desviación estándar tiene un dato de 1,166 lo que permite ver que el dato no está muy alejado, en el error estándar su valor es de 0,369 información que indica que dicho dato no es muy superior en

comparación de otros, en su intervalo de confianza los valores no están muy alejados. Para el CO₂ su media resulto un valor de 8,192, de tal forma que su desviación estándar refleja un valor de 0,543 lo que permite observar que los datos medidos no están muy intercalados, el error estándar del CO₂ tiene un valor experimental de 0,172 que a su vez no está muy alto, por último, el intervalo de confianza demuestra valores que no están muy prolongados.

En los datos experimentales del O₂ se ve un valor de la media de 5,8590 y en su desviación estándar un valor de 0,2897 que se puede definir que son valores no muy altos, en el error estándar del O₂ tiene datos de 0,0916 valores que indican que son pequeños, de igual manera en el intervalo de confianza se puede observar que mencionados valores no son muy altos. Y por último la media de lambda es de 1,0576, con su desviación estándar de 0,0633 siendo este un valor bastante pequeño, y en su error estándar el valor tomado fue de 0,0200 que indica que el valor no es muy considerable, y por su parte en el intervalo de confianza se registró datos no muy separados.

EMISIONES 55A

T de una muestra: HC; CO; CO₂; O₂; λ

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
HC	10	407,4	36,6	11,6	(381,2; 433,6)
CO	10	5,484	1,166	0,369	(4,650; 6,318)
CO ₂	10	8,192	0,543	0,172	(7,803; 8,581)
O ₂	10	5,8590	0,2897	0,0916	(5,6518; 6,0662)
λ	10	1,0576	0,0633	0,0200	(1,0123; 1,1029)

μ: media de población de HC; CO; CO₂; O₂; λ

↓	C1 HC	C2 CO	C3 CO ₂	C4 O ₂	C5 λ	C6
1	390	4,99	9,93	3,76	0,985	
2	473	4,79	9,29	4,98	1,014	
3	458	5,34	8,95	5,04	1,030	
4	485	5,78	9,38	3,73	0,956	
5	474	5,73	9,42	3,71	0,960	
6	483	5,63	9,49	3,66	0,956	
7	465	5,53	9,41	5,13	0,993	
8	463	5,28	9,64	3,73	0,972	
9	425	5,25	9,57	4,05	0,992	
10	447	5,12	9,65	3,81	0,983	

Figura 18 T de muestra de emisiones a 66 A

Fuente: Autor

3.2. Análisis comparativo

Para este análisis se compararán mediante graficas los valores promedio de cada una de las variables de estudio, así también se compara los valores de cada corrida experimental.

3.2.1. Análisis comparativo de las medias

3.2.1.1. Análisis comparativo de la media de HC

En la figura 19 se presentan los promedios de las emisiones de HC, se observa que cuando el motor funciona solo con gasolina el valor es de 544 ppm, en la prueba 1 cuando se suministra H₂ con una intensidad de trabajo de 36 A las emisiones bajan a 356.1 ppm, este comportamiento se debe a una mejor combustión de los hidrocarburos en conjunto con el H₂. A continuación para las pruebas 2 y 3 los valores son de 456.3 ppm y 407.4 ppm observándose un incremento de 100,2 ppm y 51.3 ppm respectivamente, este comportamiento se debe a que el H₂ al ser más inflamable se combustiona rápidamente con el oxígeno presente en la cámara de combustión, quedando parte del combustible sin quemarse por falta de oxígeno.

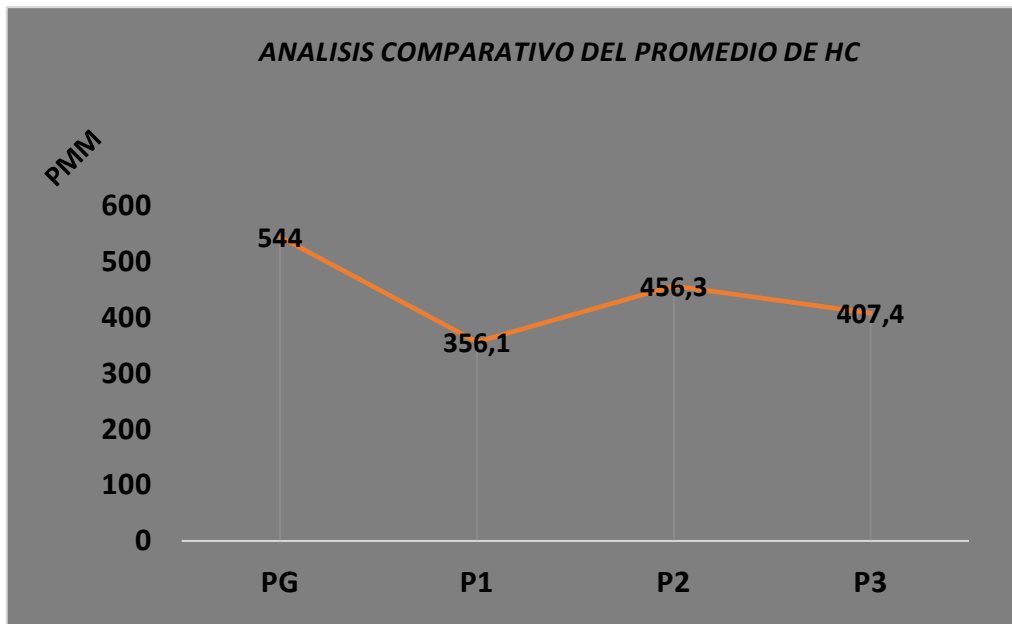


Figura 19 Análisis del promedio de HC

Fuente: Autor

3.2.1.2. Análisis comparativo de la media de CO

En la figura 20 se presentan los promedios de las emisiones de CO, se observa que cuando el motor está funcionando con gasolina el valor es de 6,32 %, lo que indica que el motor trabaja con mezcla rica, luego en la prueba 1 cuando se suministra H₂ con una intensidad de trabajo de 36 A, las emisiones bajan a 4,023 % este valor indica que la combustión se realizó de mejor manera aun cuando la mezcla sigue siendo rica. A continuación, para las pruebas 2 y 3 los valores son de 5,344 % y 5,484 % observándose un incremento del 1,32 % y 1,46 % respectivamente, este comportamiento se debe a que el hidrogeno se combustiona con el oxígeno presente en la cámara de combustión y la gasolina no encuentra el suficiente oxígeno para combustionarse aumentando el porcentaje de CO.

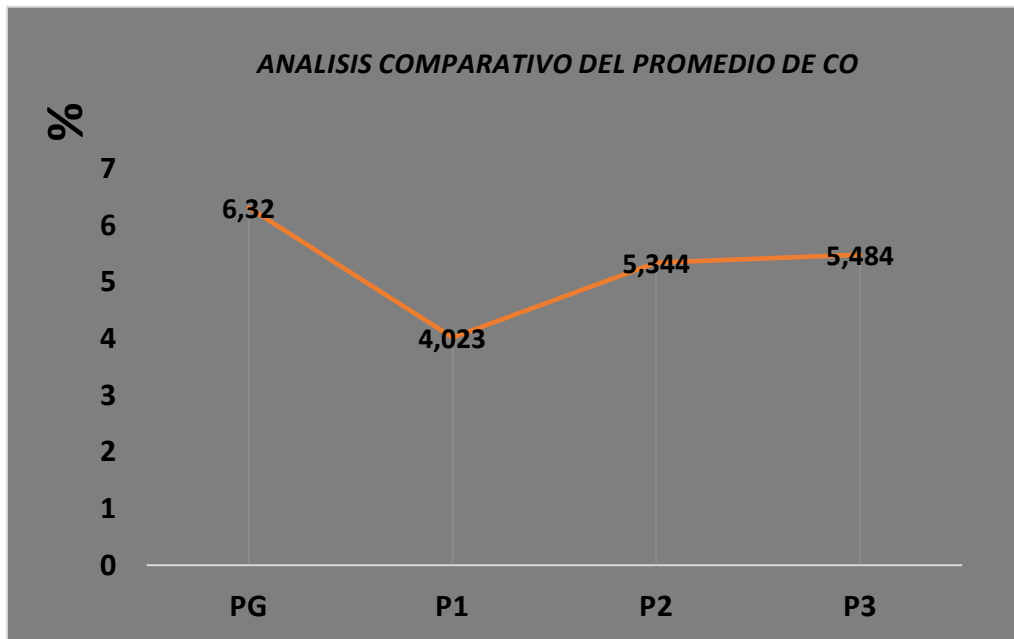


Figura 20 Análisis del promedio del CO

Fuente: Autor

3.2.1.3. Análisis comparativo de la media de CO₂

En la figura 21 se presentan los promedios de las emisiones de CO₂, se observa que cuando el motor funciona con gasolina el valor del CO₂ es de 8,72 %, inmediatamente en la prueba 1 cuando se suministra H₂ con una intensidad de trabajo de 36 A, las emisiones bajan a 7,793 % este comportamiento se debe a una mala combustión de la gasolina, siendo el H₂ el que aporta energía al ciclo por su elevado índice de inflamabilidad. En la prueba 2 se observa un valor de 9,473 %, lo que indica una mejor combustión de la gasolina, para la prueba 3 el valor es de 8,12 % que difiere en 0,56 % con respecto al prueba con gasolina, esto se indica que el motor funciona únicamente con gasolina.

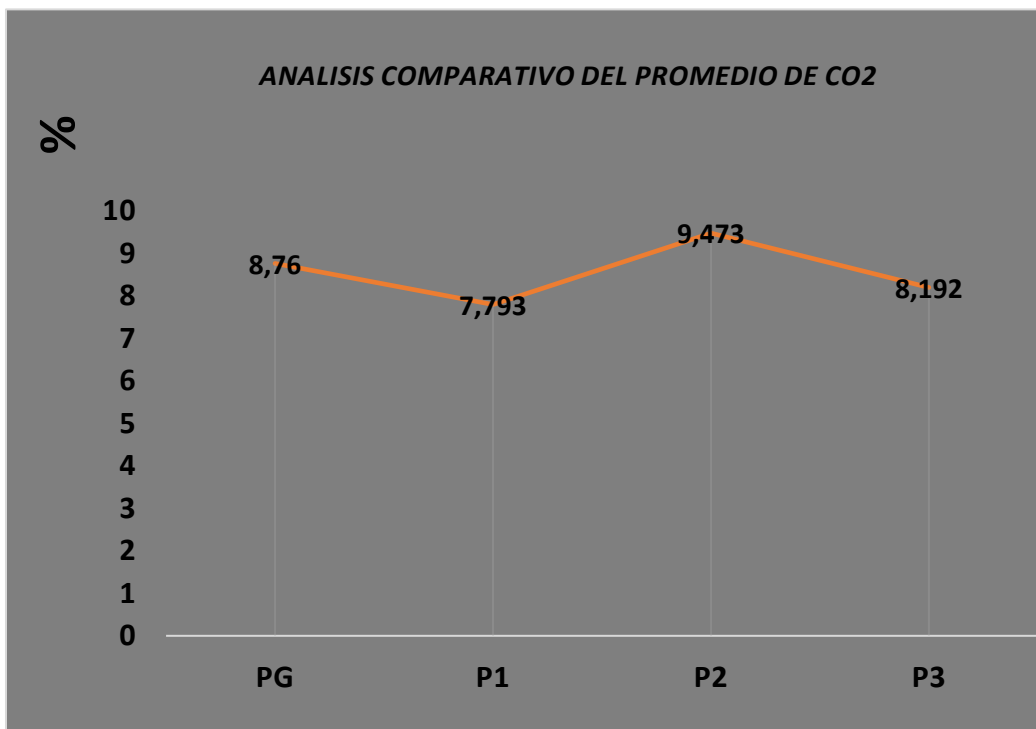


Figura 21 Análisis del promedio del CO₂

Fuente: Autor

3.2.1.4. Análisis comparativo de la media de O₂

En la figura 22 se observa los promedios de las emisiones de O₂, en la cual el motor está funcionando solo con gasolina y registra un valor de 4,29 %, luego en la prueba 1 cuando se suministra H₂ con una intensidad de trabajo 36 A, las emisiones de O₂ suben a 7,293 % este comportamiento se debe a que se empobrece la mezcla dando origen al incremento de emisiones de O₂, para la prueba 2 las emisiones del O₂ tiene un valor de 4,16 % esto puede interpretarse como una combustión únicamente de gasolina, pudiendo el hidrógeno haber salido sin combustionarse o en ese instante no hubo suministro de H₂. En la prueba 3 ocurre lo descrito en la prueba 1.

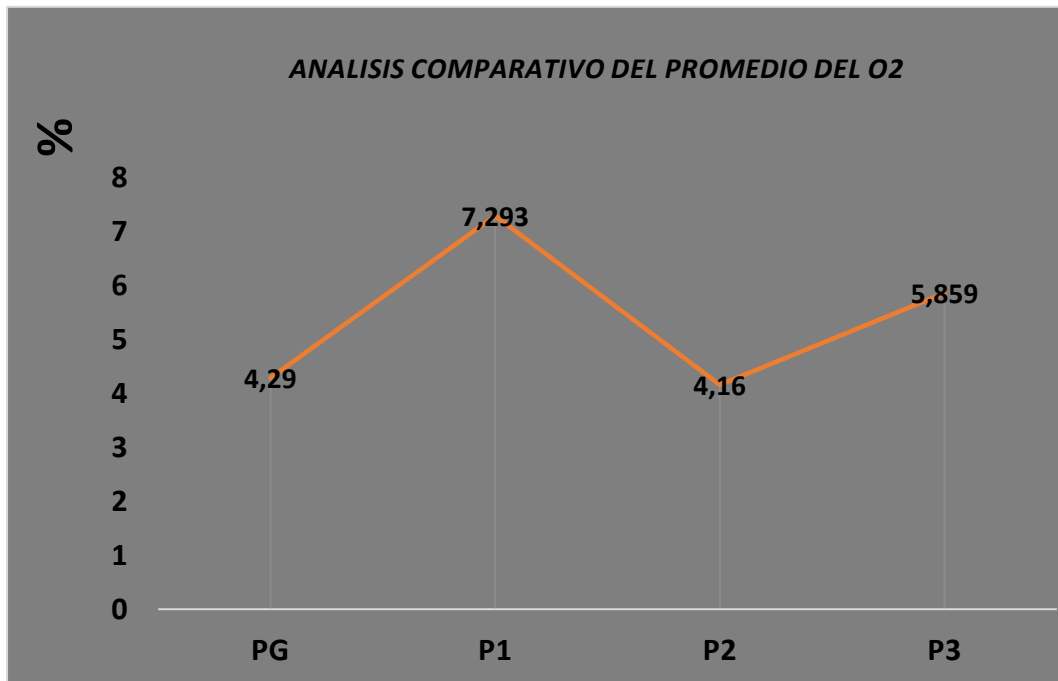


Figura 22 Análisis del promedio del O₂

Fuente: Autor

3.2.1.5. Análisis comparativo de la media de λ

En la figura 23 se presentan los promedios de λ , se observa que cuando el motor funciona solo con gasolina la mezcla es rica con un valor 0,956, luego en la prueba 1 cuando se suministra

H₂ con una intensidad de 36 A, la lambda aumenta a 1,1984 lo que indica que la mezcla se empobrece, en la prueba 2 el valor es 0,98 correspondiente a mezcla pobre y finalmente en la prueba 3 el valor es de 1,057 lo que demuestra que la mezcla es cercana al estequiometrica.

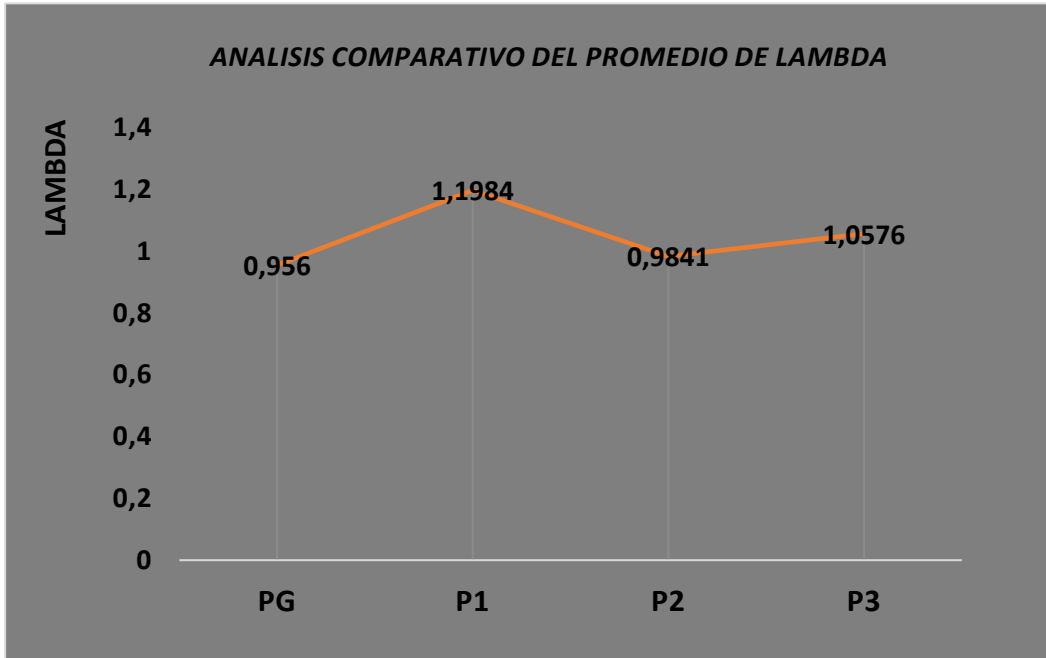


Figura 23 Análisis del promedio de lambda

Fuente: Autor

A continuación, en las figuras 24, 25, 26, 27, 28 se indican los valores de las 3 pruebas con sus respectivas corridas experimentales, donde se observa el comportamiento de cada una de ellas, en color naranja se observa los valores de emisiones referenciales, en color amarillo se observa los valores de emisiones de la prueba 1, en color verde se observa los valores de emisiones de la prueba 2 y finalmente, en color café se observa los valores de emisiones de la prueba 3.

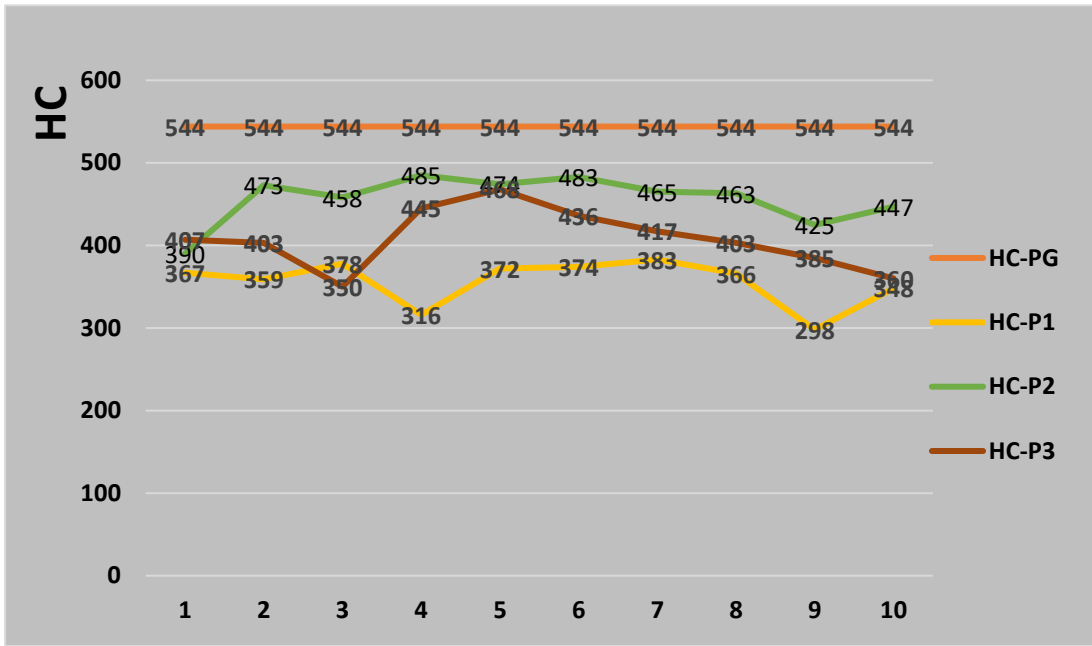


Figura 24 Corridas experimentales del HC

Fuente: Autor

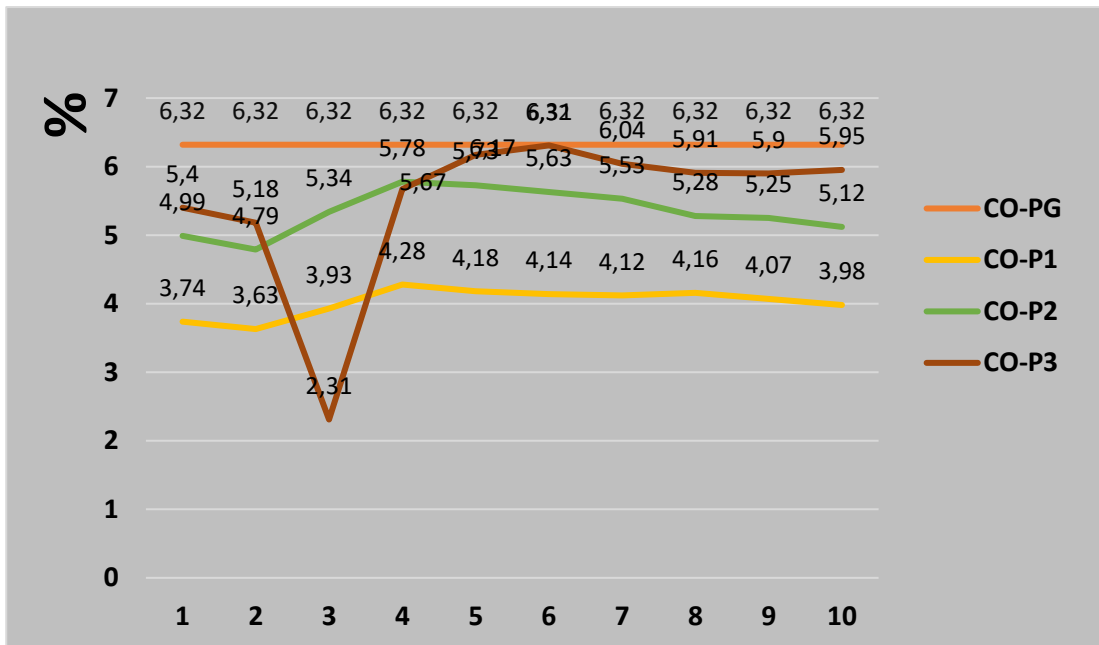


Figura 25 Corridas experimentales del CO

Fuente: Autor

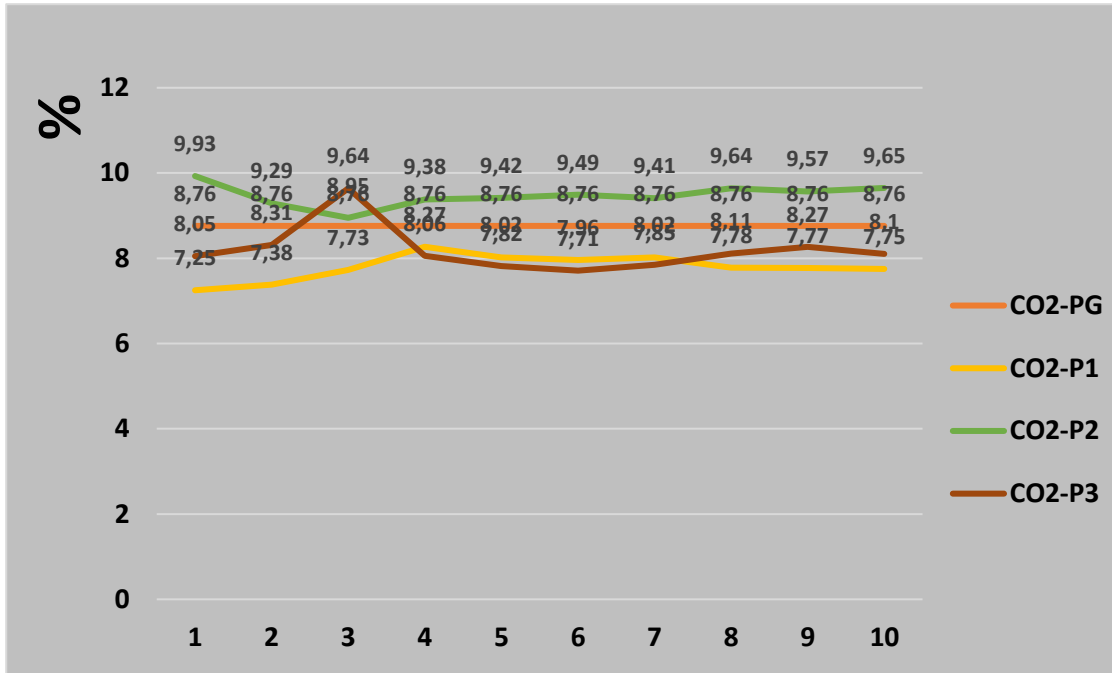


Figura 26 Corridas experimentales del CO2

Fuente: Autor

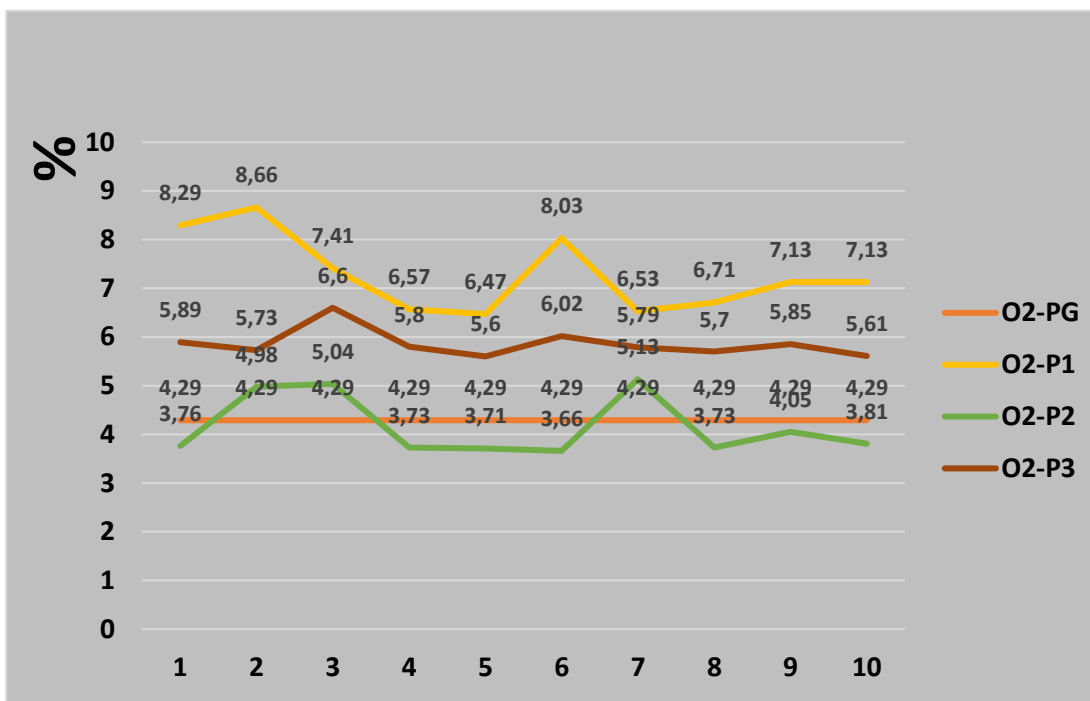


Figura 27 Corridas experimentales del O2

Fuente: Autor

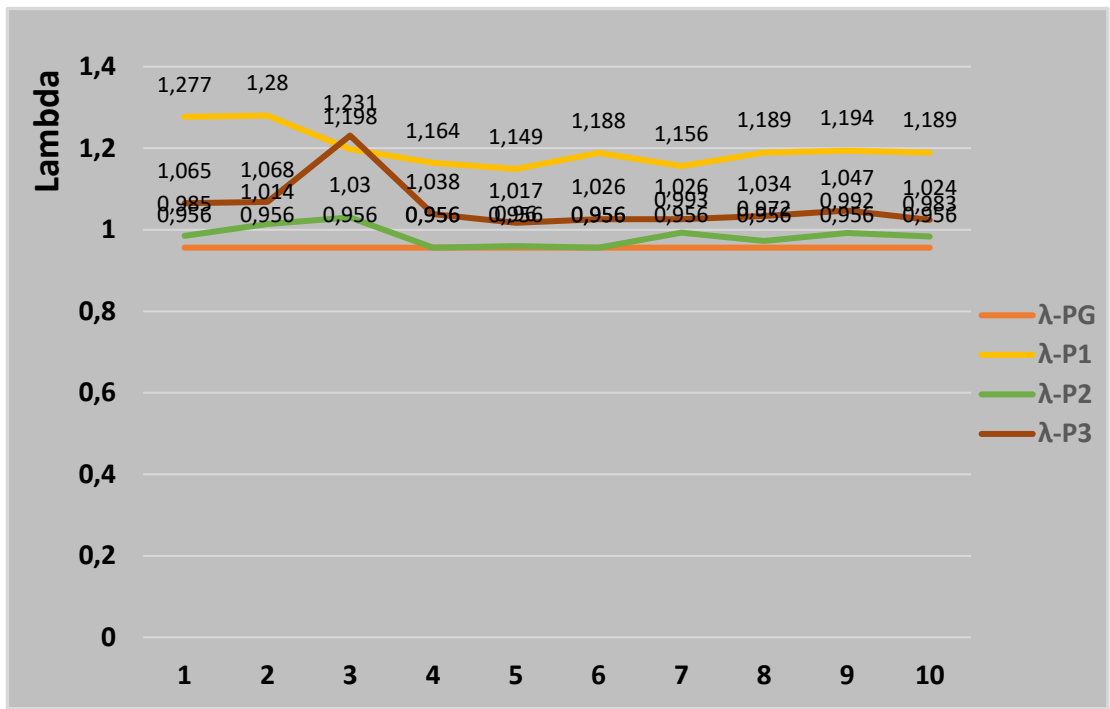


Figura 28 Corridas experimentales de lambda

Fuente: Autor

CONCLUSIONES

- Al desarrollar la estadística descriptiva en cada una de las pruebas se puede notar que la desviación estándar, el error, el intervalo de confianza tienen valores bajos los que evidencian una correcta toma de datos, por ejemplo se observa que la media del HC es de 356,1 ppm cuya desviación estándar es de 27,99 lo que permite concluir que los datos producto de las mediciones no son tan dispersos, así también el error estándar es de 8,85 valor que indica que los datos tomados entre cada corrida experimental varían mínimamente. Finalmente se observa que el intervalo de confianza presenta valores mínimo y máximo no muy separados.
- La aplicación de la estadística descriptiva en este estudio permite evidenciar que los valores obtenidos en cada una de las pruebas han sido correctamente tomados y que las variables de estudio no se han alterado por las condiciones externas (condiciones ambientales) en el momento de ejecución de cada prueba.
- El uso de H₂ permite observar una disminución en la emisión de hidrocarburos no combustiónados.
- Con respecto a las emisiones de HC, se parte de un valor referencial de 544 ppm que corresponde al motor funcionando con gasolina, en las pruebas 1, 2, 3 los valores son de 356,1 ppm; 456,3 ppm; 407,4 ppm; respectivamente esto indica que sin importar la cantidad de H₂ que se suministre las emisiones de HC presentan cierto comportamiento constante.
- Para las emisiones de CO, teniendo en cuenta un valor referencial de 6,32 % que corresponde al motor funcionando con gasolina, en las pruebas 1, 2, 3 los valores son de 4,023 %; 5,344 %; 5,484; respectivamente esto indica una disminución en este gas, de igual

manera que para el caso de los HC se observa una cierta linealidad sin importar la cantidad de H₂ suministrado.

- Para el caso del CO₂ se observa una cierta mejoría en la combustión para el caso de la prueba 2 con un valor de 9,473 % en comparación con el valor referencial que es de 8,76 %.
- Para el caso del O₂ se observa un valor de 4,16 en la prueba 2 siendo similar al valor referencial, en tanto que para las pruebas 1 y 3 los valores 7,293 y 5,859 respectivamente pudiendo esto ser ocasionado por un empobrecimiento de la mezcla en la cámara de combustión.
- Con respecto al factor lambda del análisis comparativo del promedio se observa que en la prueba 3 la mezcla tiende a ser estequiometrica con un valor de 1,057.

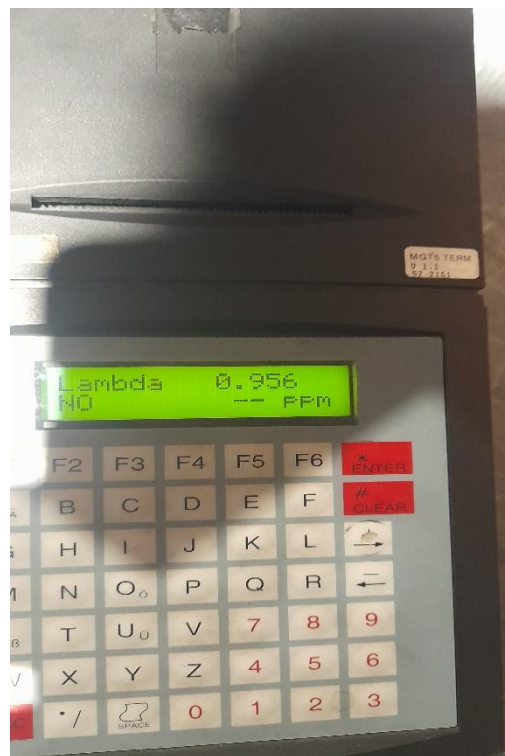
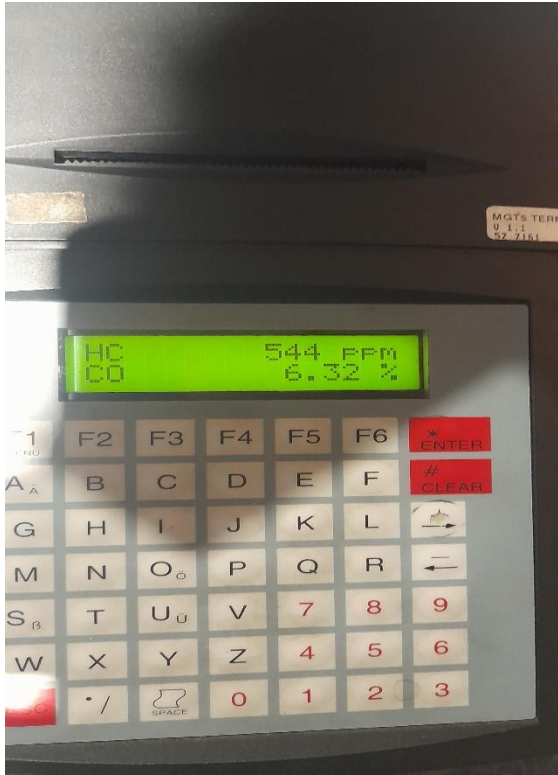
RECOMENDACIONES

- Para realizar este tipo de estudio es recomendable utilizar siempre elementos de seguridad como gafas protectoras, guates, mascarilla y mandil de trabajo.
- Al momento de preparar el electrolito se debe tener mucha precaución al trabajar con el hidróxido de sodio, pues este elemento es muy peligroso porque al momento de mezclarlo con el agua este genera vapores nocivos y al tener contacto con el mismo este puede producir quemaduras graves.
- Al utilizar el sistema generador de hidrógeno verificar que el depósito, las mangueras y la celda generadora de hidrógeno no presente fugas.
- Se recomienda colocar una válvula unidireccional en el conducto de suministro de hidrógeno para evitar detonaciones en el recipiente burbujeador del dispositivo generador de hidrógeno.
- Se recomienda realizar un estudio para analizar la generación de hidrógeno en función del tipo de electrolito y de la corriente de alimentación de la celda de hidrógeno.
- Se recomienda realizar un estudio para determinar la mezcla hidróxido de sodio agua destilada con la que se obtenga un adecuado suministro de hidrógeno.
- Se recomienda rediseñar la celda generadora de hidrógeno para evitar fugas de electrolito.
- Se recomienda realizar un estudio más amplio de la mezcla aire-hidrógeno para utilizarlo como combustible en motores de combustión interna.

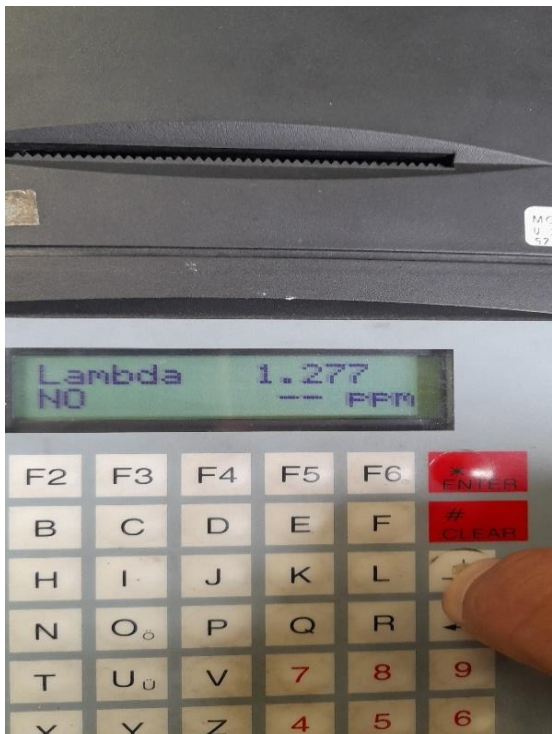
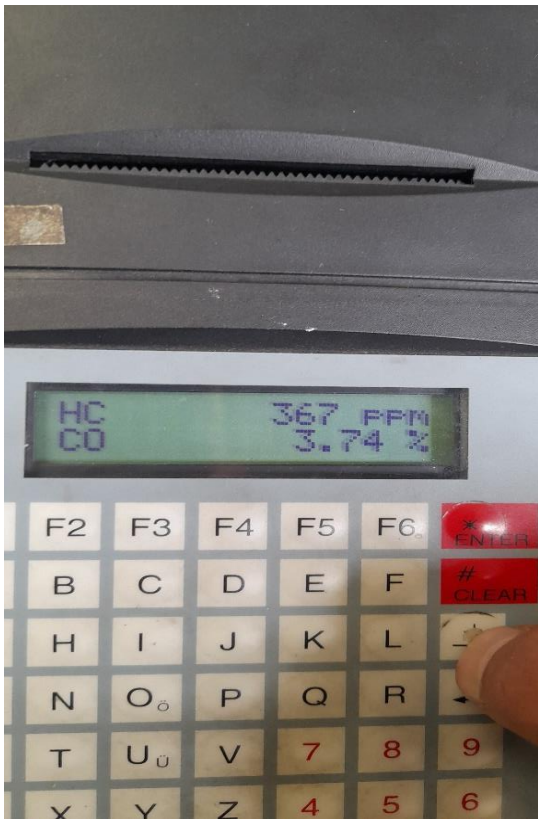
ANEXOS

Anexo 1

- Medición de emisiones solamente con gasolina, dato referencial.



- Medición de emisiones de prueba 1 a 36 A







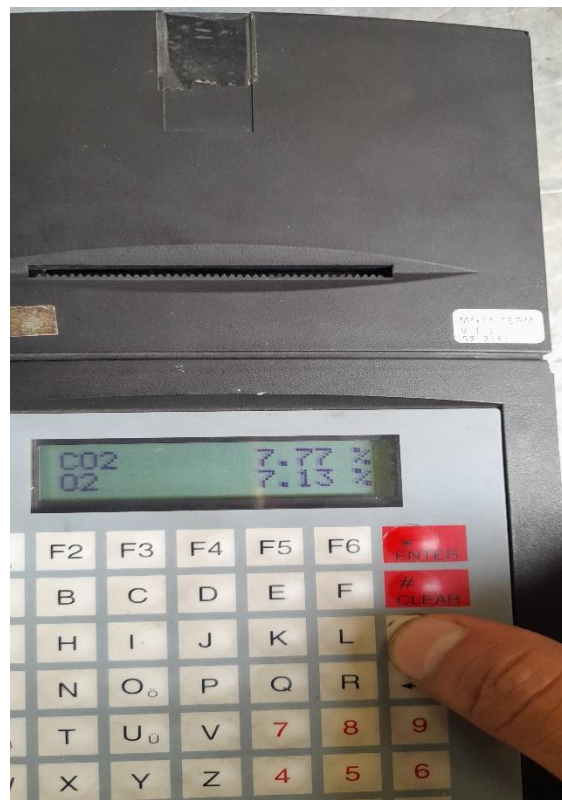
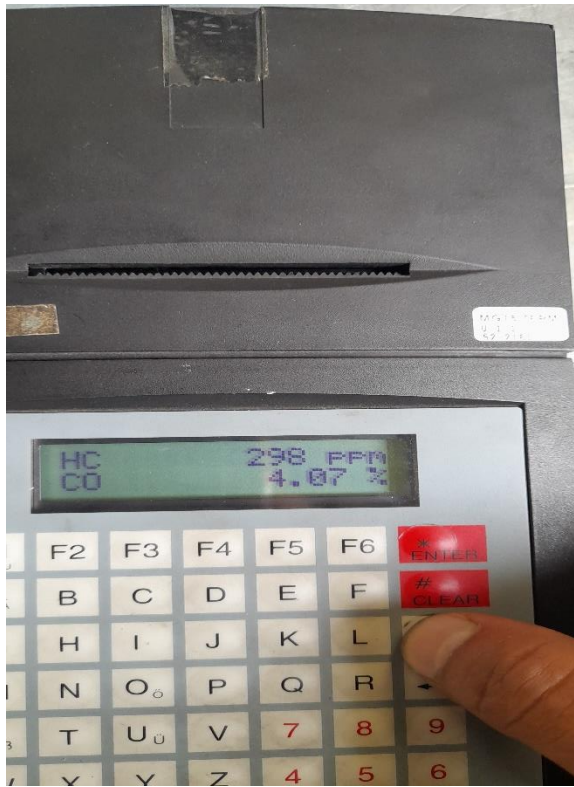








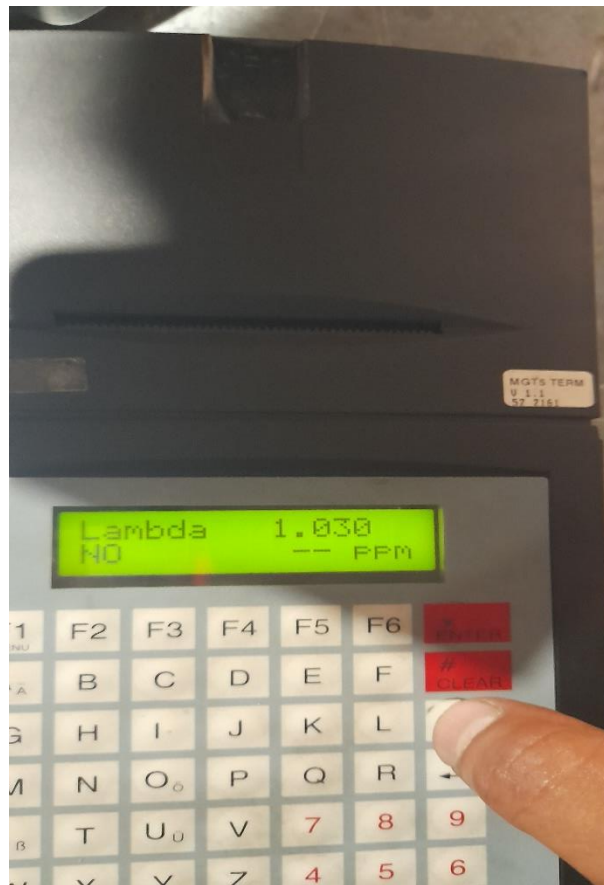
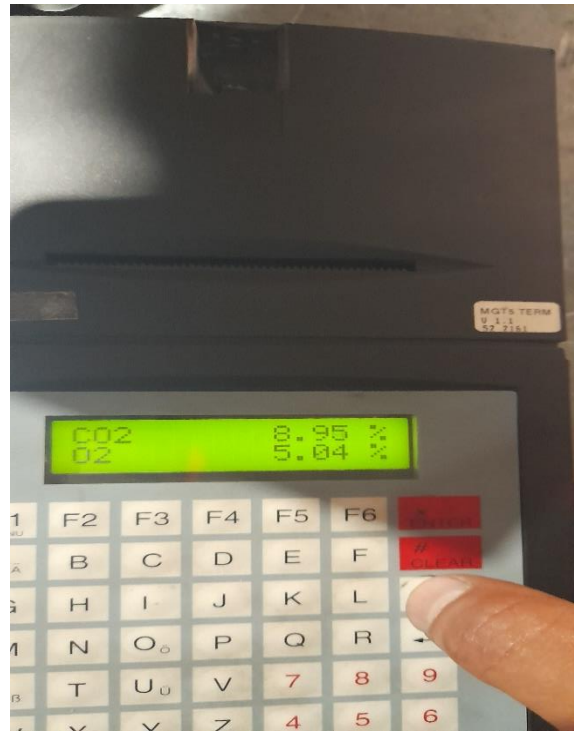




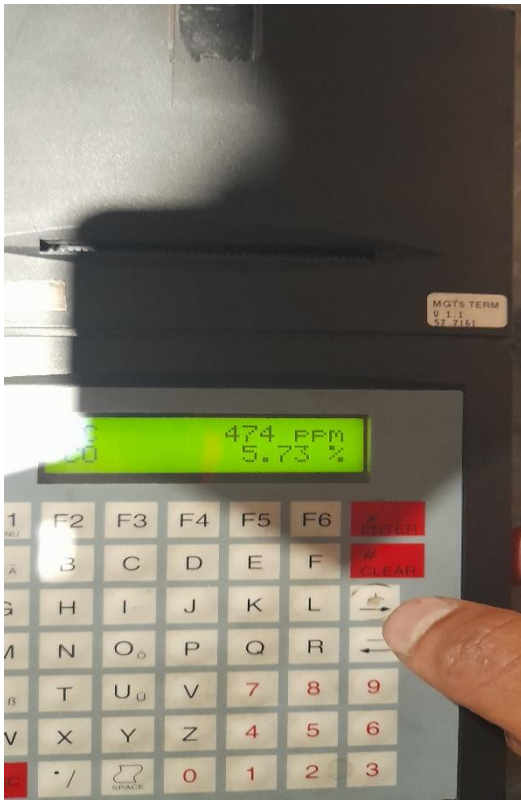


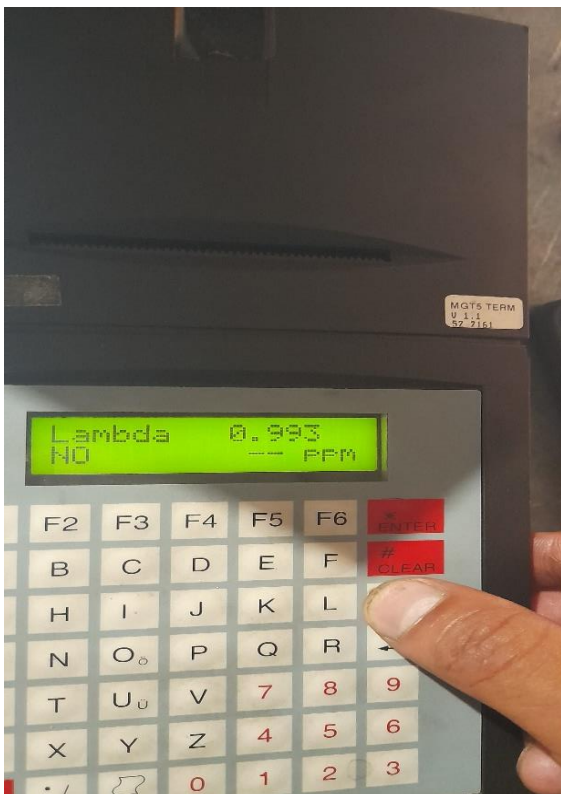
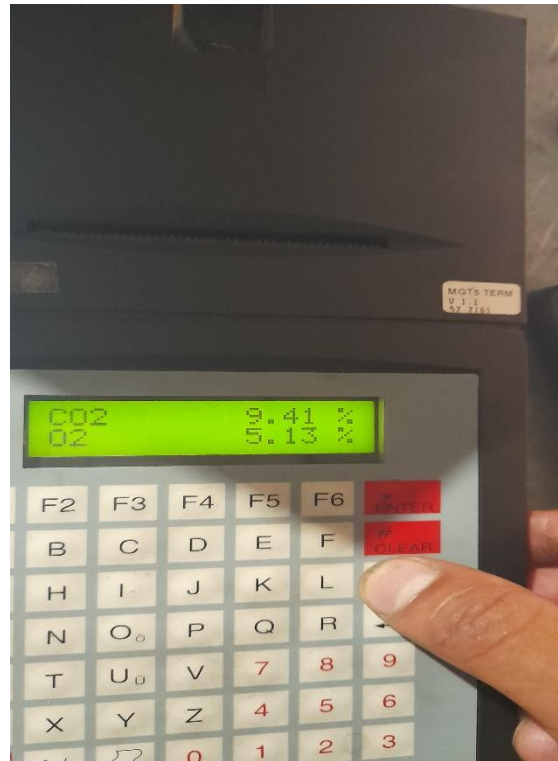
- Medición de emisiones de prueba 2 a 66 A



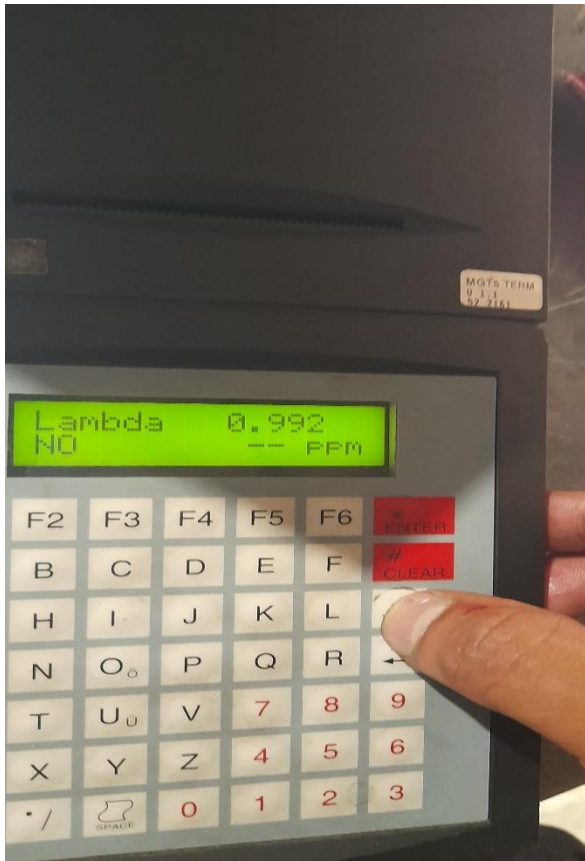




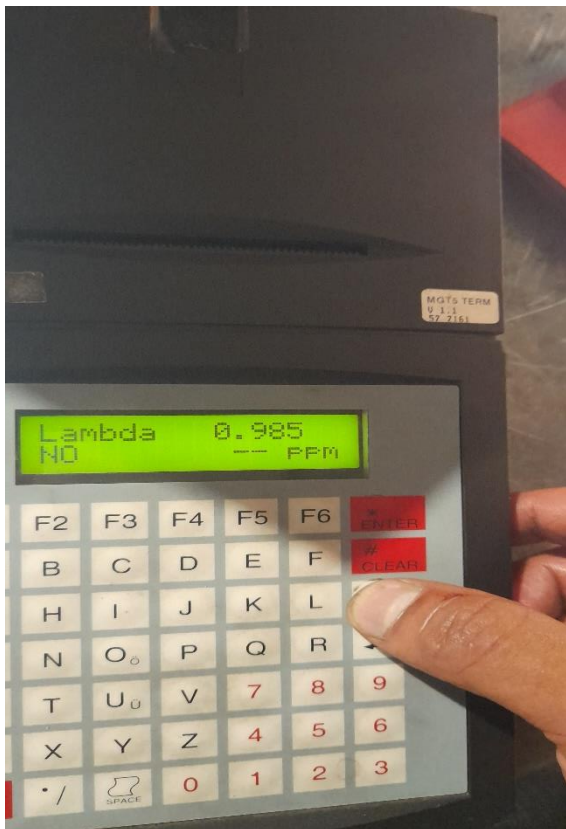
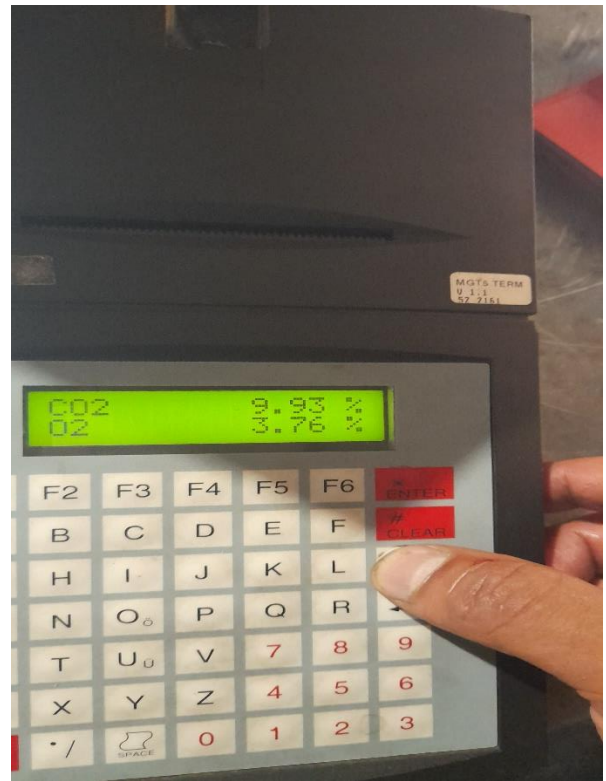
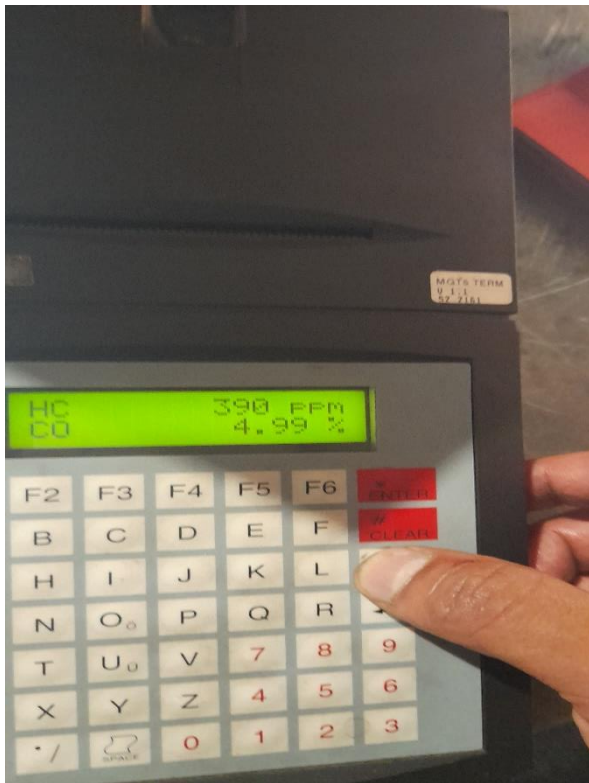




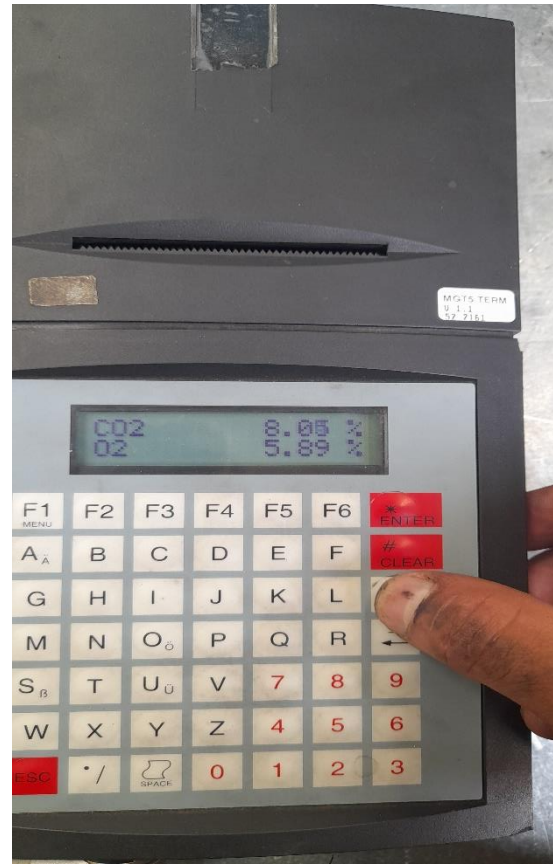




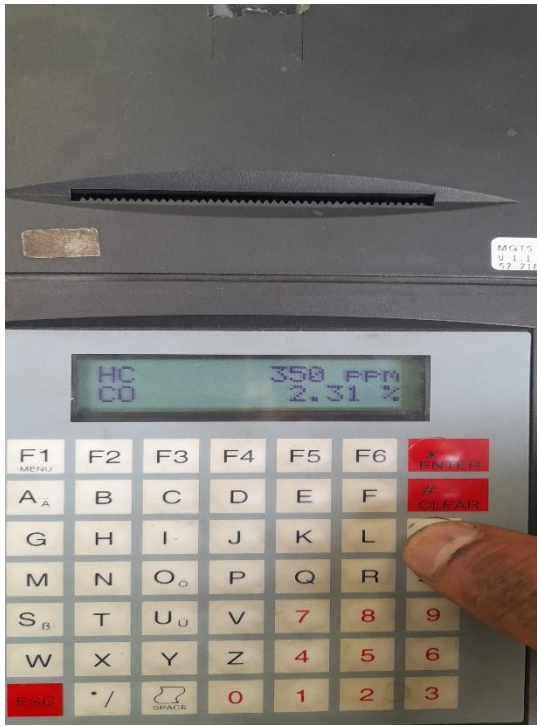




- Medición de emisiones de prueba 3 a 61 A









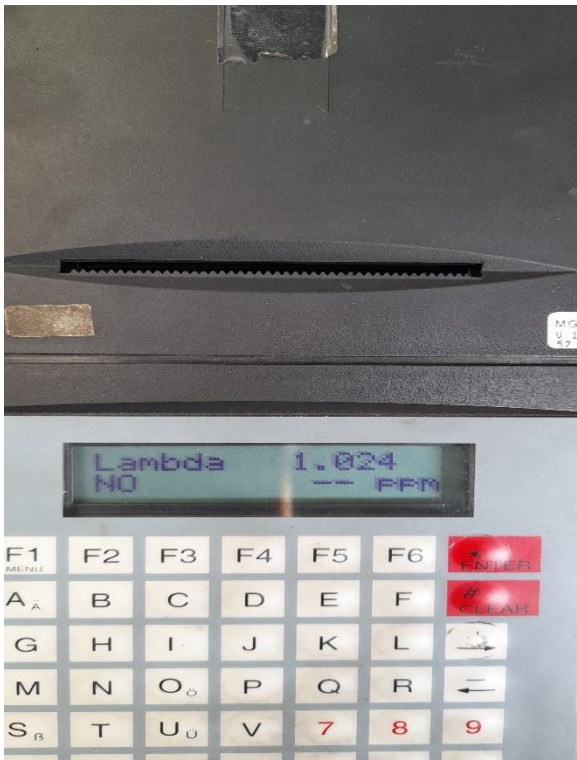
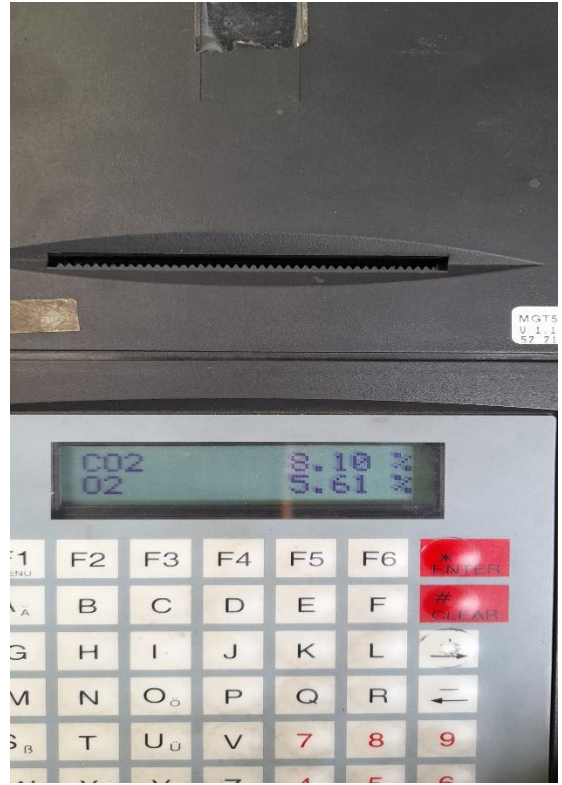












BIBLIOGRAFIA

Abraira, V. (2002). Desviación estandar y error estandar. *Semergen*.

Arrojo, J. (2015). *dialnet.unirioja.es*. (Unirioja, Editor) Obtenido de Evaluación y optimización de un motor de encendido provocado empleando combustibles alternativos ricos en hidrógeno: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203629>

CAR-TEC. (Marzo de 2022). *Car-te Automotive Engineering*. Obtenido de <https://www.car-tec.es/blog/banco-de-potencia-como-funciona/>

Cebrian, L. F. (s.f.). *Monografias.com*. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/analisis-estadistico-descriptivo/analisis-estadistico-descriptivo.pdf>

Desantes, P. y. (2011). *Motores de Combustion Interna*. Valencia: Reverte.

Ecopura. (s.f.). Obtenido de <https://www.ecopuranorte.com/caracteristicas-agua-destilada>

Eguez, A. (2021). *repositorio.uisek.edu.ec*. (UISEK, Editor) Obtenido de Evaluación del comportamiento en un motor de encendido provocado bajo mezcla de gasolina-etanol: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4251/1/Eguez%20Basantes%2c%20Xavier%20Alejandro.pdf>

Escobar, F. (2022). *repositorio.uisek.edu.ec/bitstream*. (UISEK, Editor) Obtenido de Evaluación de un motor Otto experimental de baja cilindrada bajo diferentes porcentajes de mezcla gasolina-etanol a 28509 msnm: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4559/1/Escobar%20Zapata%20Luis%20Felipe.pdf>

Estación Climatológica Cuenca. (2016). *Estación Climatológica Cuenca*. Obtenido de Estación Climatológica Cuenca.

Fernandez, P. (2022). *www.abc.es/motor/motoreco*. (abc.es, Editor) Obtenido de Funcionamiento de coches de hidrogeno: <https://www.abc.es/motor/motoreco/funcionan-coches-hidrogeno-20220803162255-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fmotor%2Fmotoreco%2Ffuncionan-coches-hidrogeno-20220803162255-nt.html>

Fernandez, S. F., Sanchez, J. M., & Largo, A. C. (2002). Estadística descriptiva. En S. F. Fernandez, J. M. Sanchez, & A. C. Largo. Madrid: ESIC Editorial.

García, G. (2020). *hibridosyelectricos.com/art*. Obtenido de Hidrógeno en motores de combustión, ¿una solución previa a la electrificación?: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/hidrogeno-motores-combustion-solucion-previa-electrificacion/20201104204015039625.html>

Gavilanes, O., & Pérez, J. (07 de 07 de 2022). <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12553>. (UTN, Editor) Obtenido de Evaluación de parámetros de sonda lambda para la repotenciación de motores de encendido provocado: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12553>

Herranz, F. (2021). *industrytalks.es/*. Obtenido de Uso del hidrogeno como combustible: <https://industrytalks.es/el-uso-del-hidrogeno-como-combustible-fortalezas-opportunidades-debilidades-1/>

Hidrógeno, C. N. (2021). *Centro Nacional del Hidrógeno*. Obtenido de <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>

Jose J. de Troya Calatayud, L. C. (s.f.). *Estudio comparativo del uso de hidrógeno frente a combustibles fosiles en motores de combustion interna* . La Coruña. España: Universidad de la Coruña.

Lopez, J. F. (03 de 01 de 2018). *Economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/media.html>

Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. (2007). *MGT 5 Analizador de 4/5 gases con terminal de mando* .

OMS. (22 de 09 de 2021). *CONTAMINACION DEL AIRE AMBIENTE*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

Pardo, D. O. (2019). *Dspace*. Obtenido de Evaluacion del rendimiento de un motor de cuatro tiempos usando hidrógeno como combustible: <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1005>

Parker, A. (2001). *Contaminación del Aire por la Industria*. Barcelona-Bogota-Buenos Aires-Caracas-Mexico-Rio de Janeiro: REVERTE.

Statologos. (29 de 05 de 2021). Obtenido de <https://statologos.com/desviacion-estandar-vs-error-estandar/>

Velastegui, S. J. (s.f.). *Edu.ec*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/9512/1/AC-ESPEL-MAI-0512.pdf>

Yumpu. (s.f.). Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14310404/hidroxido-de-sodio-417>

Zorrero, D. (2022). *infobae.com/autos*. Obtenido de El hidrogeno es la salvacion de los motores de combustion interna: <https://www.infobae.com/autos/2022/03/29/el-hidrogeno-es-la-salvacion-de-los-motores-de-combustion-interna/>