



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE HIDRÓGENO  
COMO COMBUSTIBLE SUPLEMENTARIO PARA  
IMPULSAR UN VEHÍCULO MONOPLAZA.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:**

DANNY ALEXANDER CALI PILLCO

GUSTAVO EMANUEL MARTILLO JIMÉNEZ

Riobamba -Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE HIDRÓGENO  
COMO COMBUSTIBLE SUPLEMENTARIO PARA  
IMPULSAR UN VEHÍCULO MONOPLAZA.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:** DANNY ALEXANDER CALI PILLCO

GUSTAVO EMANUEL MARTILLO JIMÉNEZ

**DIRECTOR:** Ing. JUAN CARLOS QUINCHUELA PAUCAR

Riobamba -Ecuador

2023

© 2023, **Danny Alexander Cali Pillco, Gustavo Emanuel Martillo Jiménez**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Danny Alexander Cali Pillco y Gustavo Emanuel Martillo Jiménez, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento provienen de otras fuentes que están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba 31 de mayo del 2023



---

**Danny Alexander Cali Pillco**

**150084446-7**




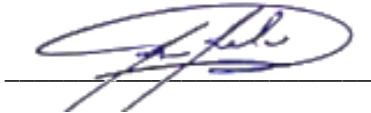
---

**Gustavo Emanuel Martillo Jiménez**

**240026354-3**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE SUPLEMENTARIO PARA IMPULSAR UN VEHÍCULO MONOPLAZA**, realizado por los señores: **DANNY ALEXANDER CALI PILLCO, GUSTAVO EMANUEL MARTILLO JIMÉNEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos legales, en la virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Milton Israel Quinga Morales <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-05-31
Ing. Juan Carlos Quinchuela Paucar <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-05-31
Ing. Javier Milton Solís Santamaria <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-05-31

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de investigación va dedicado a Dios quien ha sido mi fortaleza y permitirme llegar hasta esta etapa de mi formación universitaria, a mi familia quienes incondicionalmente me han apoyado y comprendido en todos los momentos de mi vida, por ser la mayor inspiración para enfrentar nuevos retos siendo el ejemplo más claro de esfuerzo y valentía, además de inculcarme el valor del respeto, honestidad y responsabilidad que me han ayudado a mejorar como persona y profesional.

Danny

Dedico el presente proyecto de investigación a mis padres Gustavo Eduardo Martillo y Raquel Patricia Jiménez, quienes han sido mi principal soporte a lo largo de mi carrera universitaria, por siempre creer en mí, instruyéndome a valorar todo lo que tengo mediante ejemplos de humildad, superación y perseverancia. A mis hermanos Cristina, Patricia y Benjamín, por sus palabras y compañía durante toda mi vida, es decir, a toda mi familia que es lo más valioso que Dios me ha obsequiado. Finalmente, quiero dedicar este presente trabajo a todos mis amigos, compañeros y a todas las personas que de alguna manera han contribuido para que pueda lograr mis objetivos, por lo cual toda su experiencia compartida, ha sido vital para superar los desafíos que se presentaban en el transcurso de mi vida universitaria.

Gustavo

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco profundamente a Dios por haberme guiado en el correcto sendero de la vida e iluminándome en cada paso que doy, a mis padres que con amor y cariño me acompañan en todos mis sueños y metas, además de ser la inspiración para seguir adelante pese a las adversidades.

Y, por último, pero no menos importante a mis maestros Juan Quinchuela y Javier Solís quienes con su sacrificada labor comparten sus conocimientos con paciencia y rectitud, enseñando el verdadero sentido de la responsabilidad.

Danny

Deseo agradecer a toda mi familia por el apoyo incondicional en cada decisión y proyecto que me he planteado realizar, especialmente a mis padres por el gran esfuerzo que han hecho para que yo pueda obtener mi título universitario. Finalmente, expresar mi respeto y agradecimiento a mis maestros Juan Quinchuela y Javier Solís por darnos la apertura para poder desarrollar el presente trabajo de titulación, sus consejos y guías profesionales han sido fundamentales para concluir este proyecto de investigación, además, quiero agradecer por compartir sus conocimientos y experiencia en el desarrollo de este tipo de trabajos considerando sus limitaciones.

Gustavo

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Limitaciones y delimitaciones.....	6
1.2.1. <i>Limitaciones</i> .....	6
1.2.2. <i>Delimitaciones</i> .....	7
1.3. Problema General de Investigación.....	7
1.4. Problemas Específicos de Investigación.....	8
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	8
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	8
1.6. Justificación.....	9
1.6.1. <i>Justificación teórica</i> .....	9
1.6.2. <i>Justificación metodología</i> .....	10
1.6.3. <i>Justificación práctica</i> .....	11
1.7. Hipótesis.....	12
1.8. Hipótesis nula.....	12

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Antecedentes de investigación.....	13
2.2. Marco legal.....	16
2.3. Referencias teóricas.....	18



<b>2.3.1.</b>	<b><i>Fuentes de energías</i></b> .....	18
2.3.1.1.	<i>Fuentes de energías renovables</i> .....	18
2.3.1.2.	<i>Fuentes de energías no renovables</i> .....	18
<b>2.3.2.</b>	<b><i>El Hidrógeno y sus características</i></b> .....	18
2.3.2.1.	<i>Propiedades físicas</i> .....	19
2.3.2.2.	<i>Propiedades químicas</i> .....	20
2.3.2.3.	<i>Contenido energético</i> .....	20
<b>2.3.3.</b>	<b><i>Obtención de hidrógeno</i></b> .....	21
2.3.3.1.	<i>Electrolisis del agua</i> .....	21
2.3.3.2.	<i>Reformado de hidrocarburos</i> .....	22
2.3.3.3.	<i>Descomposición termoquímica del agua</i> .....	23
2.3.3.4.	<i>Foto electrolisis</i> .....	23
2.3.3.5.	<i>Producción a partir de biomasa</i> .....	24
2.3.3.6.	<i>Procesos industriales</i> .....	25
<b>2.3.4.</b>	<b><i>Almacenaje, transporte y distribución del hidrógeno</i></b> .....	25
2.3.4.1.	<i>Estado gaseoso</i> .....	25
2.3.4.2.	<i>Estado liquido</i> .....	26
2.3.4.3.	<i>Estado solido</i> .....	26
2.3.4.4.	<i>Otros métodos de almacenaje</i> .....	27
<b>2.3.5.</b>	<b><i>Motor de combustión interna</i></b> .....	27
2.3.5.1.	<i>Ciclo Otto</i> .....	27
2.3.5.2.	<i>Eficiencia del ciclo Otto</i> .....	29
2.3.5.3.	<i>Poder calorífico del combustible</i> .....	30
2.3.5.4.	<i>Gasto del aire</i> .....	30
2.3.5.5.	<i>Parámetros efectivos</i> .....	31
2.3.5.6.	<i>Parámetros de pérdidas mecánicas</i> .....	31
<b>2.3.6.</b>	<b><i>Motores de hidrógeno</i></b> .....	32
2.3.6.1.	<i>Propiedades del combustible de hidrógeno</i> .....	32
2.3.6.2.	<i>Problemas y soluciones de pre encendido</i> .....	32
2.3.6.3.	<i>Evolución técnica de los motores de gasolina a hidrógeno</i> .....	33
2.3.6.4.	<i>Eficiencia térmica</i> .....	33
2.3.6.5.	<i>Emisiones</i> .....	34
2.3.6.6.	<i>Potencia obtenida</i> .....	34
2.3.6.7.	<i>Configuración de los motores de hidrógeno</i> .....	34
<b>2.3.7.</b>	<b><i>Celda de combustible</i></b> .....	35
2.3.7.1.	<i>Tipos de celdas de combustible</i> .....	36

2.3.7.2.	<i>Baterías acumuladoras o recargables</i> .....	37
2.3.8.	<i>El Hidrógeno como una alternativa para el futuro</i> .....	37
2.3.8.1.	<i>Economía del hidrógeno</i> .....	37
2.3.8.2.	<i>Masificación de la energía</i> .....	39

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	40
3.1.	<b>Enfoque de la investigación</b> .....	40
3.2.	<b>Nivel de investigación</b> .....	40
3.3.	<b>Diseño de investigación</b> .....	41
3.3.1.	<i>Población y planificación</i> .....	42
3.4.	<b>Tipo de estudio</b> .....	44
3.4.1.	<i>Revisión bibliográfica</i> .....	44
3.4.2.	<i>Desarrollo de la investigación</i> .....	45
3.4.3.	<i>Análisis de la información</i> .....	45
3.4.3.1.	<i>Método descriptivo</i> .....	45
3.4.3.2.	<i>Método analítico</i> .....	45
3.4.3.3.	<i>Método transversal</i> .....	46
3.4.3.4.	<i>Método inductivo</i> .....	46
3.5.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos</b> .....	46
3.5.1.	<i>Adaptación del generador de hidrógeno al vehículo monoplaza</i> .....	47
3.5.1.1.	<i>Conexiones eléctricas</i> .....	47
3.5.1.2.	<i>Conexión al múltiple de admisión</i> .....	49
3.5.1.3.	<i>Ubicación y electrolito del generador de hidrógeno</i> .....	50
3.5.1.4.	<i>Flujo másico de producción de hidrógeno</i> .....	52
3.5.1.5.	<i>Escala de Beaufort</i> .....	56
3.5.2.	<i>Prueba de funcionamiento para valorar el rendimiento del motor</i> .....	57
3.5.2.1.	<i>Anclaje del vehículo</i> .....	57
3.5.2.2.	<i>Banco de pruebas de rodillos</i> .....	58
3.5.3.3.	<i>Conexión del banco de pruebas a la computadora</i> .....	59
3.5.3.4.	<i>Programa del banco de pruebas y curvas de resultados</i> .....	59
3.5.3.5.	<i>Proceso de evaluación del rendimiento del motor</i> .....	60
3.5.3.6.	<i>Validación del dinamómetro de rodillos</i> .....	62
3.5.4.	<i>Prueba de funcionamiento para evaluar el consumo de combustible</i> .....	63
3.5.4.1.	<i>Ciclo de conducción</i> .....	63

3.5.4.2.	<i>Elementos para determinar el consumo de combustible</i>	64
3.5.4.3.	<i>Detalles de la ruta planificada</i>	65
3.5.4.4.	<i>Validación del ciclo de conducción urbano</i>	66
3.5.5.	<b><i>Prueba de funcionamiento para examinar la emisión de gases de escape</i></b>	66
3.5.5.1.	<i>Analizador de gases de escape</i>	66
3.5.5.2.	<i>Límites de contaminación en Ecuador</i>	67
3.5.5.3.	<i>Normativa vigente en Ecuador</i>	69
3.5.5.4.	<i>Concentraciones de las emisiones de gases de escape</i>	69
3.5.5.5.	<i>Analizador de encendido y tacómetro digital</i>	70
3.5.5.6.	<i>Proceso de evaluación de la concentración de gases</i>	71
3.5.5.7.	<i>Validación del analizador de gases</i>	73

#### **CAPÍTULO IV**

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.</b>	75
4.1.	<b>Adaptación del generador de hidrógeno.</b>	75
4.2.	<b>Rendimiento del motor</b>	79
4.3.	<b>Consumo de combustible</b>	83
4.4.	<b>Concentración de gases de escape</b>	86
4.4.1.	<b><i>Relación entre aire, combustible e hidrógeno</i></b>	91

#### **CAPÍTULO V**

5.	<b>MARCO PROPOSITIVO</b>	95
5.1.	<b>Propuesta</b>	95

	<b>CONCLUSIONES</b>	97
--	---------------------	----

	<b>RECOMENDACIONES</b>	100
--	------------------------	-----

#### **BIBLIOGRAFÍA**

#### **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Energía específica de varios combustibles .....	9
<b>Tabla 2-1:</b>	Grupo de estándares relevantes internacionales para regulación del hidrógeno	17
<b>Tabla 2-2:</b>	Propiedades físicas del hidrógeno H <sub>2</sub> .....	19
<b>Tabla 2-3:</b>	Equivalencias entre hidrógeno y energía.....	20
<b>Tabla 2-4:</b>	Equivalencias (valor energético) entre hidrógeno y otros combustibles .....	21
<b>Tabla 2-5:</b>	Comparación de un motor BMW convencional y con hidrógeno .....	35
<b>Tabla 2-6:</b>	Ventajas e inconvenientes del hidrógeno .....	38
<b>Tabla 3-1:</b>	Comercialización de motocicletas en Ecuador.....	43
<b>Tabla 3-2:</b>	Escala de Beaufort para clasificar la fuerza del viento.....	57
<b>Tabla 3-3:</b>	Ficha técnica de la motocicleta.....	61
<b>Tabla 3-4:</b>	Valores máximos de contaminación de norma INEN 2 204 – Prueba estática .	68
<b>Tabla 3-5:</b>	Valores máximos de contaminación de norma INEN 2 204 – Prueba dinámica	68
<b>Tabla 4-1:</b>	Mediciones de velocidad del flujo de hidrógeno.....	76
<b>Tabla 4-2:</b>	Temperatura promedio del flujo másico de producción del generador de hidrógeno.....	77
<b>Tabla 4-3:</b>	Comparación de la potencia y torque de los dos sistemas de alimentación .....	82
<b>Tabla 4-4:</b>	Porcentajes de consumo de combustible de una alimentación únicamente de gasolina.....	83
<b>Tabla 4-5:</b>	Porcentajes de consumo de combustible con una alimentación de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina .....	84
<b>Tabla 4-6:</b>	Comparación de consumo y costos de los tipos de alimentación.....	84
<b>Tabla 4-7:</b>	Estimación de ahorro del combustible durante un año.....	85
<b>Tabla 4-8:</b>	Porcentajes de variación de emisiones con y sin la implementación del generador de hidrógeno .....	90
<b>Tabla 4-9:</b>	Balance estequiométrico con los productos del sistema de alimentación con gasolina.....	92
<b>Tabla 4-10:</b>	Masa molecular total de los reactivos y productos del sistema de alimentación con gasolina.....	92
<b>Tabla 4-11:</b>	Balance estequiométrico con los productos del sistema de alimentación con una mezcla gasolina e hidrógeno .....	93
<b>Tabla 4-12:</b>	Masa molecular total de los reactivos y productos del sistema de alimentación con una mezcla gasolina e hidrógeno .....	94

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-1:</b>	Países con mayor acumulación de CO <sub>2</sub> desde 1850 al 2021 .....	3
<b>Ilustración 1-2:</b>	Crecimiento población desde 1950 al 2050 .....	4
<b>Ilustración 1-3:</b>	Vehículos matriculados en Ecuador desde 2010 al 2020 .....	5
<b>Ilustración 1-4:</b>	Los países con las mayores reservas de petróleo en número de barriles .....	6
<b>Ilustración 2-1:</b>	Electrolisis del agua .....	22
<b>Ilustración 2-2:</b>	Foto electrolisis .....	24
<b>Ilustración 2-3:</b>	Ciclo ideal de un motor de combustión interna 4 tiempos .....	27
<b>Ilustración 2-4:</b>	Ciclo real de un motor de combustión interna 4 tiempos .....	28
<b>Ilustración 2-5:</b>	Eficiencia térmica de un ciclo ideal Otto .....	29
<b>Ilustración 2-6:</b>	Eficiencia térmica de un ciclo ideal Otto con las relaciones de calores específicos. ....	30
<b>Ilustración 2-7:</b>	Motor adaptado para que funcione con hidrógeno .....	34
<b>Ilustración 2-8:</b>	Motor rotativo Wankel .....	35
<b>Ilustración 2-9:</b>	Esquema del funcionamiento de una celda de combustible .....	36
<b>Ilustración 3-1:</b>	Esquema empleado para el diseño de la investigación.....	42
<b>Ilustración 3-2:</b>	Esquema representativo para realizar las pruebas de funcionamiento .....	47
<b>Ilustración 3-3:</b>	(a) Conexión del polo negativo, (b) Conexión del polo positivo, (c) Cableado del accionador del halógeno del freno de la llanta posterior .....	48
<b>Ilustración 3-4:</b>	(a) Interruptor del generador de hidrógeno, (b) Pinza amperimétrica Fluke 325, (c) Regulador de voltaje de 12 voltios a 1 voltio .....	49
<b>Ilustración 3-5:</b>	Instalación de la conexión del generador de hidrógeno en el múltiple de admisión .....	50
<b>Ilustración 3-6:</b>	(a) Ubicación del generador de hidrógeno, (b) Tamaño del generador de hidrógeno.....	51
<b>Ilustración 3-7:</b>	(a) Probeta graduada de 25 mililitros, (b) Balanza digital.....	51
<b>Ilustración 3-8:</b>	Analizador de gases, testo 340 .....	52
<b>Ilustración 3-9:</b>	Tubo Pitot Prandtl o curvado .....	52
<b>Ilustración 3-10:</b>	Entrada de presión positiva .....	53
<b>Ilustración 3-11:</b>	(a) Opción del menú principal “Mediciones”, (b) Opción del menú de mediciones “ft/min” .....	53
<b>Ilustración 3-12:</b>	Proceso de medición de velocidad .....	54
<b>Ilustración 3-13:</b>	(a) Opción del menú de mediciones “Flue gas + ft/min”, (b) Proceso de medición de la temperatura y porcentaje de oxígeno .....	55

<b>Ilustración 3-14:</b>	Calibrador o pie de rey .....	55
<b>Ilustración 3-15:</b>	Cuerda de carga.....	57
<b>Ilustración 3-16:</b>	Banco de rodillos mixtos de la marca Motorroll .....	58
<b>Ilustración 3-17:</b>	Amplificador de celdas del dinamómetro de rodillos.....	59
<b>Ilustración 3-18:</b>	(a) Prueba de funcionamiento en el dinamómetro, (b) Datos reales del ensayo en el software de Motorroll, (c) Software donde se visualizan las curvas de la prueba de potencia del motor .....	62
<b>Ilustración 3-19:</b>	Ciclo de conducción trazado por los tres puntos principales .....	63
<b>Ilustración 3-20:</b>	(a) Frasco graduado de 1000 mililitros, (b) Probeta graduada 25 mililitros	64
<b>Ilustración 3-21:</b>	Analizador de gases auto plus de la marca Kane .....	67
<b>Ilustración 3-22:</b>	Analizador de encendido y tacómetro digital GTC TA100 SmarTach+ .....	70
<b>Ilustración 3-23:</b>	(a) Conexión del sensor al cable de la bujía; (b) Configuración del número de ciclos y cilindros.....	71
<b>Ilustración 3-24:</b>	Valores predeterminados luego de la calibración inicial.....	72
<b>Ilustración 3-25:</b>	Conexión de la sonda en el tubo de escape .....	72
<b>Ilustración 3-26:</b>	Caballote de motocicleta .....	73
<b>Ilustración 4-1:</b>	Curvas de potencia y torque del vehículo alimentado con gasolina.....	79
<b>Ilustración 4-2:</b>	Resumen de datos relevantes de la prueba con alimentación de gasolina....	80
<b>Ilustración 4-3:</b>	Curvas de potencia y torque del vehículo alimentado con una mezcla de hidrógeno gaseoso y gasolina.....	81
<b>Ilustración 4-4:</b>	Resumen de datos relevantes de la prueba con alimentación de una mezcla de hidrógeno gaseoso y gasolina.....	81
<b>Ilustración 4-5:</b>	Porcentajes promedios de las concentraciones de gases emitidos en pruebas estáticas .....	86
<b>Ilustración 4-6:</b>	Partes por millón de hidrocarburos no quemados de los gases de escape en pruebas estáticas.....	87
<b>Ilustración 4-7:</b>	Factor lambda promedio en pruebas estáticas.....	87
<b>Ilustración 4-8:</b>	Porcentajes promedios de las concentraciones de gases emitidos en pruebas dinámicas.....	88
<b>Ilustración 4-9:</b>	Promedio de partes por millón de hidrocarburos no quemados en pruebas dinámicas.....	89
<b>Ilustración 4-10:</b>	Factor lambda promedio en pruebas dinámicas .....	89

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** LISTA DE MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO MONOPLAZA ANTES DE REALIZAR LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO
- ANEXO B:** PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO MONOPLAZA
- ANEXO C:** INTENSIDAD (AMPERIO) DEL CONSUMO ELÉCTRICO APROXIMADO DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO
- ANEXO D:** VOLTAJE (VOLTEO) DEL CONSUMO ELÉCTRICO CON EL ANTIGUO REGULADOR DE VOLTAJE
- ANEXO E:** BANCO DE PRUEBAS DE RODILLO MIXTOS DE LA MARCA MOTOROLL USADO PARA LAS PRUEBAS DE POTENCIA Y TORQUE
- ANEXO F:** USO DE LOS ELEMENTOS DE MEDICIÓN EN LAS PRUEBAS PARA EVALUAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE
- ANEXO G:** PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE SIGUIENDO UN CICLO DE CONDUCCIÓN EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA
- ANEXO H:** MEDICIÓN DE LAS REVOLUCIONES POR MINUTO EN LAS PRUEBAS ESTÁTICAS PARA EVALUAR LA CONCENTRACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE
- ANEXO I:** IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO EN UNA MOTOCICLETA
- ANEXO J:** CURVAS MÍNIMAS DE POTENCIA Y TORQUE DEL VEHÍCULO ALIMENTADO CON GASOLINA
- ANEXO K:** CURVAS MÍNIMAS DE POTENCIA Y TORQUE DEL VEHÍCULO ALIMENTADO CON UNA MEZCLA DE HIDRÓGENO GASEOSO Y GASOLINA
- ANEXO L:** CONCENTRACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN PRUEBAS ESTÁTICAS
- ANEXO M:** CONCENTRACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN PRUEBAS DINÁMICAS

## RESUMEN

La progresiva escasez de los combustibles fósiles debido a su alta demanda a nivel mundial, además de generar la mayor concentración de gases contaminantes, causan cambios climáticos. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue analizar la factibilidad de implementar un generador de hidrógeno gaseoso como combustible adicional en un motor de combustión interna de un vehículo monoplaça, se demostró que existe una reducción en el rendimiento del motor, consumo de combustible y gases contaminantes. La metodología del trabajo fue realizar una campaña experimental o pruebas de funcionamiento sobre las tres evaluaciones destacables. Los resultados fueron: en el primer ensayo se obtuvo una reducción 1,6 HP de potencia y 3,01 Nm de torque, no obstante, el segundo ensayo indicó un ahorro de combustible del 14,13% y en el último ensayo sobre la concentración de los gases de escape, de igual forma se obtuvo una reducción en pruebas estáticas en un rango de 800 a 900 rpm y de 2.000 a 2.500 rpm respectivamente, tal disminución fue de 0,77% y 0,85% de CO<sub>2</sub>, 0,68% y 0,47% de CO, 126,50 PPM y 71,25 PPM de HC, y un aumento 1,32% y 0,47% de O<sub>2</sub>; en condiciones dinámicas se obtuvo una reducción promedio de 0,73% de CO<sub>2</sub>, 2,00 de CO, 510,10 PPM y un aumento de 1,67% de O<sub>2</sub>. En comparación a la descripción de los fabricantes del generador de hidrógeno, lo cuales detallaron que: aumenta la potencia del motor, disminuye el consumo de combustible entre un rango de 20 a 40%, además, de una reducción del 80% de los gases contaminantes, por esta razón, mediante este estudio se comprobó que aquellas especificaciones no son válidas.

**Palabras clave:** <GENERADOR DE HIDRÓGENO GASEOSO>, <MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA>, <MOTOCICLETA>, <RENDIMIENTO DEL MOTOR>, <CONSUMO DE COMBUSTIBLE>, <EMISIÓN DE GASES>.

1245-DBRA-UPT-2023





## SUMMARY

The progressive scarcity of fossil fuels due to their high demand worldwide, in addition to generating the highest concentration of polluting gases, cause climate change. Therefore, the objective of this research was to analyze the feasibility of implementing a gaseous hydrogen generator as additional fuel in an internal combustion engine of a single-seater vehicle, it was shown that there is a reduction in engine performance, fuel consumption, and gases contaminants. The methodology of the work was to carry out an experimental campaign or performance tests on the three notable evaluations. The results were: in the first test a reduction of 1,6 HP of power and 3,01 Nm of torque was obtained, however, the second test indicated a fuel saving of 14,13% and in the last test on the concentration of exhaust gases, in the same way, a reduction was obtained in static tests in a range of 800 to 900 rpm and from 2.000 to 2.500 rpm respectively, such decrease was 0,77% and 0,85% of CO<sub>2</sub>, 0,68% and 0,47% CO, 126,50 PPM and 71,25 PPM HC, and an increase 1,32% and 0,47% O<sub>2</sub>; under dynamic conditions, an average reduction of 0,73% of CO<sub>2</sub>, 2,00 of CO, 510,10 PPM and an increase of 1,67% of O<sub>2</sub> was obtained. Compared the description of the manufacturers of the hydrogen generator, which detailed that: increases engine power, and decreases fuel consumption between a range of 20 to 40%, in addition to an 80% reduction in polluting gases for this reason, through this study, it was verified that those specifications are not valid.

**Keywords:** <HYDROGEN GASE GENERATOR> <INTERNAL COMBUSTION ENGINE> <MOTORCYCLE> <ENGINE PERFORMANCE> <FUEL CONSUMPTION> <GASES EMISSION>.



Licda. Mónica A. Castelo Reyna.

C.I: 060453982-5

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda elevada del uso de combustibles derivados del petróleo es un problema, las reservas de petróleo a través de los años tienen una progresiva disminución lo cual influirá en aspectos políticos, sociales y económicos, en la mayoría de los casos en los diferentes países por su alta dependencia, según Sáinz (2014, pp. 1-3) los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y una de las principales fuentes de emisión de gases contaminantes.

El consumo de combustibles fósiles o derivados del petróleo es muy alto, el cual está provocando resultados negativos como gases tóxicos, cambios climatológicos y gases de efecto invernadero (también conocidos como GEI). Los vehículos con motores de combustión interna son los causantes de generar óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas sólidas, debido a esto la población y fabricantes de vehículos automotores buscan alternativas ecológicas con el fin de generar una fuente de energía limpia y evitar la dependencia de los combustibles fósiles, la implementación del hidrógeno es una alternativa innovadora en el sector automotriz.

El gas inerte de hidrógeno es un elemento muy abundante y ligero, ya que constituye aproximadamente de las tres cuartas partes de la materia cósmica que se encuentra en el universo. Además, es un gas incoloro inodoro, no tóxico y buen combustible, ya que es capaz de proporcionar más energía que cualquier otro combustible conocido, con una cantidad de energía almacenada de 33.59 kWh/kg en unidad de masa, siendo superior que a los 13.9 kWh/kg del gas natural y 12.36 kWh/kg correspondiente a la gasolina. También es un combustible limpio, debido a que cuando este se quema, lo que genera aparte de energía es vapor de agua, aportando a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Cando y Quelal, 2012, p. 22).

En el presente proyecto de investigación aspira a manifestar los alcances de la implementación de hidrógeno en estado gaseoso en un motor de combustión interna de cuatro tiempos de un vehículo monoplaza, para fomentar el uso del hidrógeno, que es el gas inerte con mayor abundancia en el medio ambiente y de accesible obtención, puesto que a partir del agua se obtiene dicho gas mediante un suministro de corriente continua con un óptimo electrolito, dicho proceso se denomina electrolisis que divide el agua en sus dos únicas moléculas que son oxígeno e hidrógeno.

El hidrógeno como combustible alternativo o suplementario contribuye en la base de un futuro de nuevos modelos de energías renovables, de tal modo que aporta a la reducción de la contaminación ambiental, a la vez se estimula el uso de energías limpias para reducir las emisiones de GEI. En automoción, el hidrógeno puede emplearse en dos líneas tecnológicas como combustible en motores de combustión interna (quemando el hidrógeno para producir energía mecánica) y pilas de combustible de hidrógeno para vehículos eléctricos (convierten directamente el hidrógeno en energía eléctrica). Los motores de combustión interna a base de hidrógeno son una tecnología factible, existe una posibilidad de manufactura de motores que sean capaces de operar indistintamente con gasolina e hidrógeno, lo cual podría ser un punto esencial durante el periodo de transición de motores de combustión de gasolina a hidrógeno para su acelerada introducción en la industria automotriz.

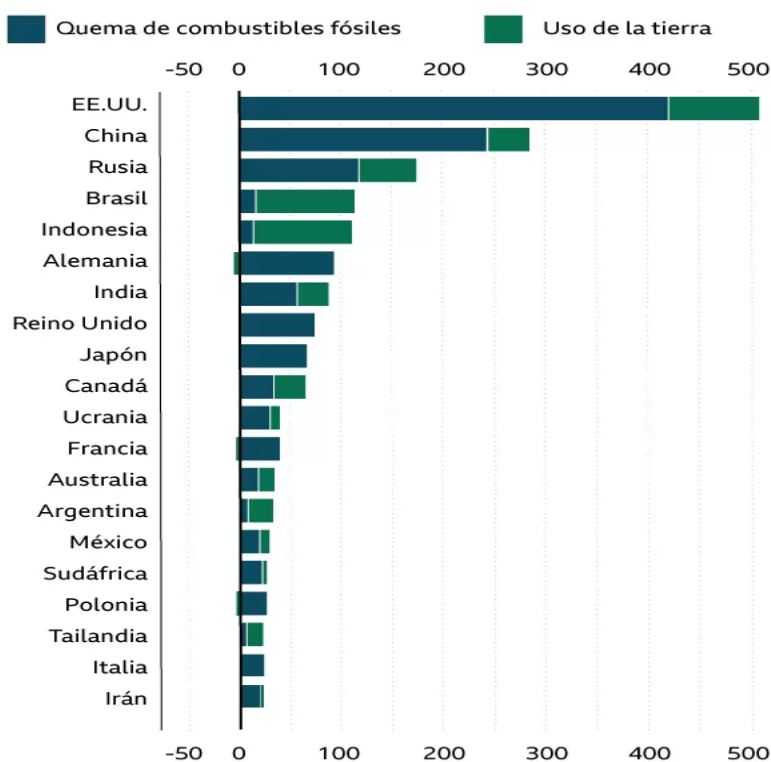
La finalidad de este proyecto es implementar un generador de hidrógeno como combustible suplementario en un vehículo monoplaza, posteriormente a la adaptación de dicho vehículo, se realizarán pruebas de funcionamiento para determinar el rendimiento del motor, consumo de combustible y los gases de escape en los dos casos de estudio, tanto con el uso únicamente de gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina. Se realizará un análisis y comparación de los datos obtenidos de las pruebas de funcionamiento para demostrar que el uso de hidrógeno como combustible suplementario mejorará la eficiencia del motor y reducirá el impacto ambiental producido por el sector automotriz.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del Problema

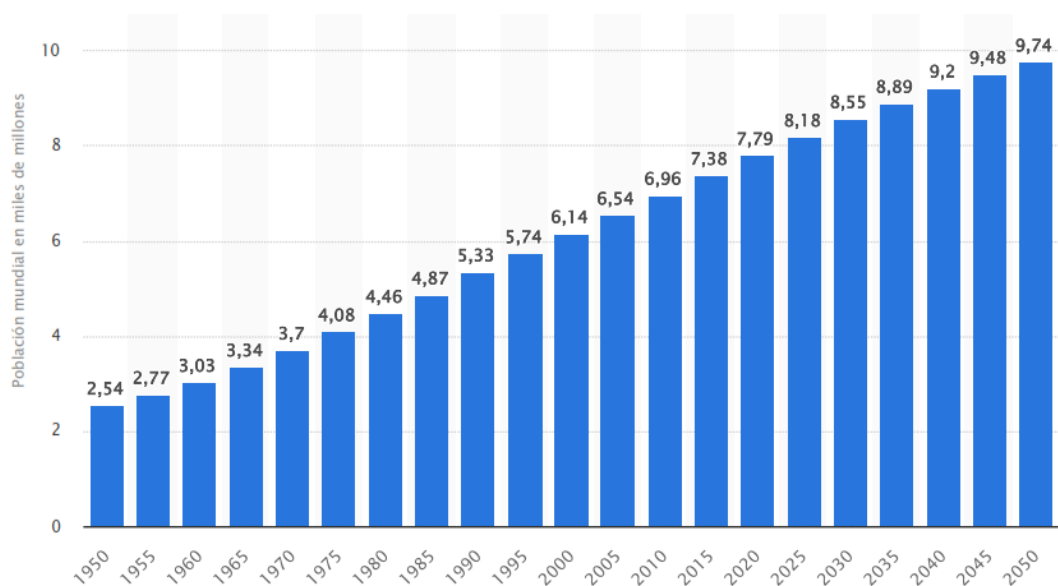
La humanidad ha logrado grandes avances debido a la implementación de combustible fósiles o energías no renovables (carbón, petróleo y gas natural), pero el costo medioambiental es demasiado alto en comparación al bajo rendimiento de estas energías. Además, la demanda de la energía crece constantemente por el incremento de la población mundial. El sector automotriz a nivel mundial es responsable de manera significativa en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), por lo que se requiere contar con energías renovables. El uso de hidrógeno ha sido implementado en los últimos años con el fin de llegar o al menos acercarse a un modelo de desarrollo sostenible, siendo una fuente energética de bajo impacto para el medio ambiente y seres vivos. En la ilustración 1-1 se muestra los países con mayor acumulación de emisiones de CO<sub>2</sub> desde 1850 al 2021, la cual separa las emisiones por quema de combustibles fósiles y uso de tierra (deforestación), la escala comienza de 0 a 500 megatoneladas de CO<sub>2</sub>.



**Ilustración 1-1:** Países con mayor acumulación de CO<sub>2</sub> desde 1850 al 2021

Fuente: (Carbon Brief, 2021).

La conciencia de la humanidad a nivel mundial sobre las consecuencias de la contaminación ambiental ha mejorada continuamente, sin embargo, esta percepción colectiva no basta para evitar la excesiva contaminación medioambiental, de modo que no se considera con el compromiso que corresponde a los graves daños ambientales, por lo cual debe ser un tema muy significativo para obtener acciones de forma particular y colectiva. Como efecto de este problema, los recursos naturales continúan explotándose con bajas limitaciones, debido al incremento de la demanda económica y energética que ofrecen dichos recursos. Acerca de la información expuesta en convenciones a nivel mundial que tratan la problemática ambiental con campañas de reciclajes y movimientos ecológicos, a pesar de aquello, sigue demostrando insustanciales cambios para reducir las emisiones de gases contaminantes. El gobierno ecuatoriano no es capaz de imponer nuevas políticas que demuestren acciones de un antes y después sobre las tasas de contaminación del aire del sector industrial y particular por parte de la población.

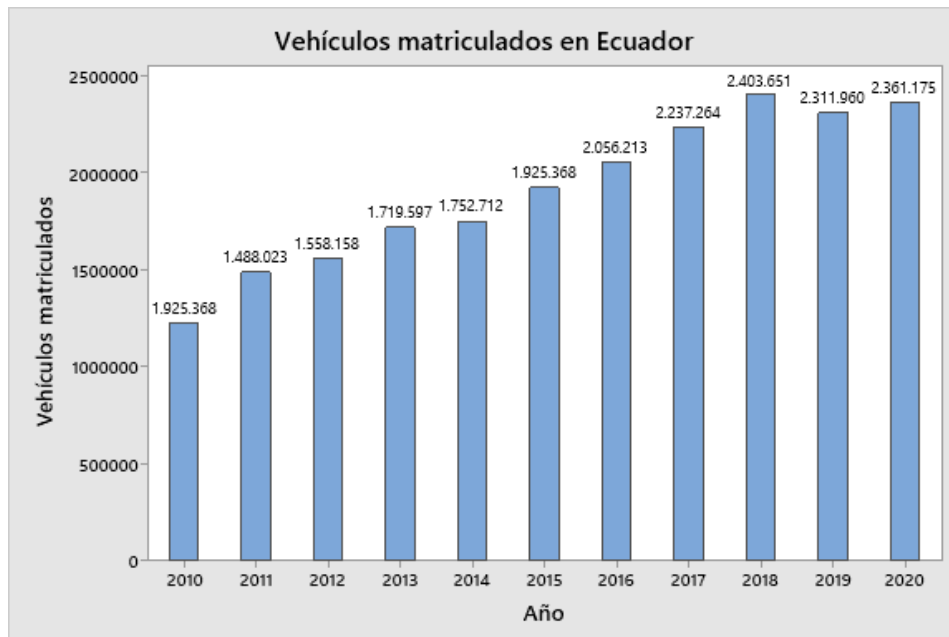


**Ilustración 1-2:** Crecimiento población desde 1950 al 2050

**Fuente:** (Fernández, 2021)

El problema se origina con el crecimiento exponencial de la especie humana, de acuerdo con varias cifras, la población era de mil millones de personas hasta el año 1825, a partir de la revolución del carbón esta cifra se duplicó, en la era del petróleo incremento en tres mil millones de personas hasta 1960, posteriormente hasta el año del 2020 la cifra aproximada es de 7,79 mil millones de habitantes según Fernández (2021), en la ilustración 1-2 se muestra el crecimiento poblacional desde 1950 al 2050. Lo cual significa que las necesidades aumentaron en relación con el crecimiento poblacional en todos los aspectos como: vestimenta, salud, educación, transporte, entre otros.

Por ello la invención del automóvil ha sido una de las principales causas de la contaminación ambiental, de modo que se requiere investigar e implementar otras alternativas para ayuden a reducir el impacto ambiental, con el objeto de concientizar el consumo combustible y emisiones de gases de escape de los vehículos, (Hidalgo y León, 2021, p. 38) indica en la ilustración 1-3 los vehículos matriculados en Ecuador desde el 2010 hasta el 2020, lo que demuestra el crecimiento del sector automotriz, y por ende incrementa la contaminación del ambiente, en concreto en las ciudades más pobladas del país.

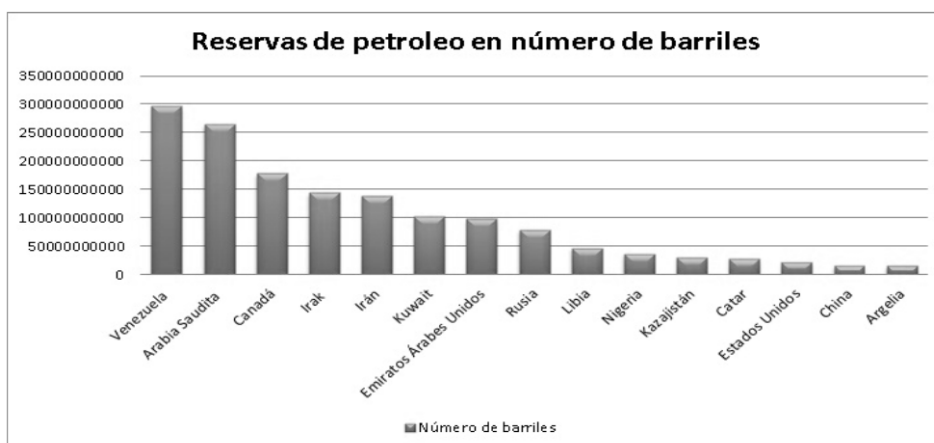


**Ilustración 1-3:** Vehículos matriculados en Ecuador desde 2010 al 2020

**Fuente:** (Hidalgo y León, 2021, p. 38)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Existe una gran relación entre las actividades humanas y movilidad, a nivel mundial los medios de transporte abarcan todo tipo de maquinarias como automóviles, motocicletas, barcos, aviones y todo transporte que posea un motor que use combustibles obtenidos del petróleo. Las actividades cotidianas de la población tienen una gran dependencia del petróleo, el mismo que es considerado como un recurso limitado, Borja et al. (2014, pp. 11-18) afirma que “las mayores reservas de petróleo se encuentran en: Venezuela, Arabia Saudita, Canadá, Irán, Iraq, Kuwait, Emiratos Árabes Unidos, Rusia, EE. UU., entre otros” lo cual se evidencia en la ilustración 1-4.



**Ilustración 1-4:** Los países con las mayores reservas de petróleo en número de barriles

Fuente: (Borja et al., 2014, pp. 11-18)

En teoría, la implementación del hidrógeno como combustible en automotores de combustión interna es sencilla, pero en la práctica se tiene varios inconvenientes que han impedido poner en marcha el desarrollo de automóviles con este tipo de fuente de energía, una de estas deficiencias es su alta capacidad de combustión que incrementa el nivel de peligro en las operaciones de almacenamiento de hidrógeno en tanques o reservorios de los vehículos automotores. Otro de los inconvenientes, es que el hidrógeno en estado natural es un gas y para poder garantizar la misma autonomía que en los automotores convencionales, el hidrógeno en estado líquido es la mejor opción para una segura distribución y factibilidad al momento de reabastecer el tanque de combustible.

## 1.2. Limitaciones y delimitaciones

### 1.2.1. Limitaciones

Para el desarrollo de este trabajo tendremos ciertas limitaciones como: tipo presupuestal en donde el uso de recursos económicos reduce la obtención de materiales o equipos. Actualmente en este caso se trabajará en un motor de cuatro tiempos de combustión interna de un vehículo de tipo monoplaza, debido a esto surge la limitación para experimentar debido a la falta de equipos para un mejor desenvolvimiento en el trabajo investigativo, se considera que a partir de la adaptación del generador de hidrógeno gaseoso al motor de cuatro tiempos y por las condiciones climáticas del lugar en donde se realizara las debidas pruebas, este último se llevara a cabo en la ciudad de Riobamba, región sierra del Ecuador.

El tiempo estimado para la finalización del proyecto de investigación es una limitación muy significativa por parte de las directrices de la asignatura de Integración Curricular, la misma que

establece un periodo de 16 semanas para concluir con todos los objetivos y memoria técnica del presente proyecto, lo cual restringe el alcance del proyecto en busca de soluciones viables o factibles para el proyecto planteado, la metodología debe estar muy detallada y programada dentro del tiempo estimado de 16 semanas para escribir un artículo académico de éxito con resultados beneficios hacia el caso de estudio, el cual es demostrar la factibilidad del uso de hidrógeno como combustible suplementario para aumentar la eficiencia del motor, reducir el consumo de combustible y la emisión de gases de escape de un vehículo monoplace.

### ***1.2.2. Delimitaciones***

En el presente trabajo también conlleva algunas delimitaciones relacionadas con la adaptación y manipulación del gas hidrógeno al ser utilizado como combustible suplementario, el más significativo es su almacenamiento, el cual debe disponer de una basta de reserva o deposito para garantizar la cantidad adecuada que requiera el motor de combustión; además, que al ser un gas muy ligero, inodoro e incoloro es más difícil de detectar y al igual que cualquier gas, este es muy volátil e inflamable, por lo cual la investigación se centrara en aspectos fundamentales que son: la eficiencia del motor, el consumo de combustible y emisión de gases que permite evaluar su concentración de componentes contaminantes.

La relación entre la cantidad de hidrógeno generado y energía es una delimitación crucial, porque se necesita un gran cantidad de este combustible para que un motor entre un régimen correcto de funcionamiento, en el caso de usar solamente hidrógeno como fuente de alimentación, por ende a mayor demanda de esta fuente de energía renovable se necesita una amplia cantidad de energía eléctrica; como consecuencia se suministrará hidrógeno gaseoso como un combustible adicional, es decir, para la combustión del vehículo monoplace se utilizará una mezcla de hidrógeno con gasolina.

### **1.3. Problema General de Investigación**

Es evidente que el uso de combustibles derivados del petróleo son la fuente fundamental de energía, no solo para motores de combustión interna pertenecientes al sector automotriz, también son los principales contaminantes al medio ambiente y el ser humano a nivel mundial, consecuentemente durante el transcurso de los años se ha reflejado una progresiva disminución de esta fuente energética, por tal motivo se plantea una alternativa y suplemento energético más viable con un menor índice de emisión de gases de escape, mayor rendimiento del motor de un



vehículo monoplaza y reducción de consumo de combustible, a la cual se podrá responder lo siguiente:

¿Es factible la implementación de un generador de hidrógeno gaseoso en un motor de combustión interna de un vehículo monoplaza para demostrar un aumento del rendimiento del motor y un ahorro del consumo de combustible y emisión de gases?

#### **1.4. Problemas Específicos de Investigación**

¿Es posible adaptar un sistema generador de hidrógeno gaseoso a un motor de combustión interna de un vehículo monoplaza como combustible suplementario?

¿El uso de hidrógeno como combustible suplementario mostrará un aumento del rendimiento del motor a través de un dinamómetro de rodillos?

¿El uso de hidrógeno como combustible suplementario indicará una reducción del consumo de combustible por medio de un ciclo de conducción urbano en la ciudad de Riobamba?

¿La implementación del hidrógeno como combustible suplementario mostrará una reducción en la emisión de gases producto de la combustión a través de un analizador de gases?

#### **1.5. Objetivos**

##### ***1.5.1. Objetivo general***

Analizar la factibilidad del uso de hidrógeno como combustible suplementario para impulsar un motor de combustión de cuatro tiempos de un vehículo monoplaza mediante una mezcla de gas de hidrógeno y gasolina.

##### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

- Adaptar un motor de combustión interna de un vehículo monoplaza mediante un óptimo método de electrolisis de agua para suministrar hidrógeno en estado gaseoso como fuente adicional de propulsión mecánica.
- Realizar pruebas de funcionamiento para valorar y mostrar el rendimiento del motor mediante un dinamómetro de rodillos.
- Ejecutar pruebas de funcionamiento para evaluar el consumo de combustible mediante un ciclo de conducción urbano en la ciudad de Riobamba.
- Realizar pruebas de funcionamiento para evaluar e indicar la concentración de los gases nocivos productos de la combustión mediante un analizador de gases.

## 1.6. Justificación

### 1.6.1. Justificación teórica

El proyecto de investigación tiene la finalidad de demostrar la factibilidad del uso de hidrógeno como un suplemento ecológico para reducir el consumo de combustibles fósiles, de esta forma aporta una alternativa ecológica y eficiente para poder reducir los gases contaminantes, además, de mantener o incrementar la eficiencia energética de los vehículos automotores. La implementación de motores de combustión interna con hidrógeno gaseoso como combustible adicional, permite que dicha mezcla de gasolina con hidrógeno proporcione energía calórica, que a su vez se transforme directamente en energía para que los automotores puedan realizar la propulsión mecánica como generalmente sucede con los vehículos que usan exclusivamente combustibles fósiles. El hidrógeno tanto en estado líquido como gaseoso posee el mayor calor de combustión como se muestra en la tabla 1-1, la energía que proporciona el combustible cuando se quema en una unidad de masa, es decir, una alta cantidad de energía específica.

**Tabla 1-1:** Energía específica de varios combustibles

Estado	Combustible	Energía específica (kWh/kg)
Gaseoso	Hidrógeno	33,59
	Metano	11,39
	Gas natural	10,6 – 13,93
	Etano	14,42
	Propano	12,88
	Butano	12,73
Líquido	Hidrógeno	33,59
	Gasolina	12,36
	Benceno	11,75
	Etanol	8,251
	Metanol	5,47
	Amoníaco	5,706

**Fuente:** (Peretti y Visintin, 2018, p. 2)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

El hidrógeno no es considerado como una fuente de energía primaria, debido a que es una energía portadora, la misma que es liberada cuando entra en un proceso de combustión, la obtención del hidrógeno a partir del agua mediante un proceso de electrólisis, el cual necesita electricidad como fuente primaria de energía, siendo notable que el agua de donde se extrae el hidrógeno al separar sus moléculas por dicho proceso, es uno de los elementos más abundantes en el mundo, tal fuente

de energía portadora se consolida en un combustible abundante y renovable. Las diferencias entre el hidrógeno y los combustibles fósiles son los residuos que estos expulsan tras su combustión, los cuales son vapor de agua y partículas de carbono, respectivamente, como resultado es considerado un combustible limpio, libre de contaminantes nocivos para el ambiente.

El desarrollo de nuevas tecnologías en el sector automotriz avanza constantemente con la misión de diseñar y construir vehículos que sean capaces de reducir la contaminación del aire (las emisiones de gases de efecto invernadero) y tierra (fluidos usados en para la lubricación, refrigeración y componentes automotrices). Esto incentiva a investigar la factibilidad sobre cómo el agua puede utilizarse como fuente de energía adicional en el desarrollo de un sistema que pueda generar hidrógeno como combustible suplementario para vehículos automotores. El hidrógeno como combustible ofrece un excelente complemento para reducir el consumo de los combustibles fósiles, ya que para realizar la combustión se introduce una mezcla de gas hidrógeno y gasolina durante el tiempo de llenado de la cámara de combustión, además, tiene el potencial suficiente para brindar soluciones limpias o amigables hacia el medio ambiente, debido a que reduce las emisiones nocivas. Por ello se pone en marcha este proyecto de investigación, el cual consiste en determinar la factibilidad del uso de hidrógeno como combustible suplementario en un motor de cuatro tiempos de un vehículo monoplaza, bajo la convicción de reducir el consumo de combustibles fósiles y la contaminación ambiental.

### ***1.6.2. Justificación Metodología***

El trabajo por desarrollar ofrece la mejor manera para implementar un generador de hidrógeno para un motor de combustión interna de un vehículo monoplaza, utilizando los componentes adecuados que se requiere para la producción del gas de hidrógeno, con su respectiva seguridad acoplada al chasis y motor de cuatro tiempos estableciendo un adecuado desempeño. El generador de hidrógeno implementado en el vehículo lleva a cabo la electrólisis del agua, que es uno los procesos más simples y efectivos para extraer hidrógeno gaseoso, dicho método necesita electricidad como fuente de energía primaria, por consiguiente, se realiza una mezcla del hidrógeno extraído con gasolina para que complemente el proceso de combustión, y así reducir el impacto ambiental y los gases de efecto invernadero.

La implementación del hidrógeno como combustible suplementario, es la mejor vía para obtener resultados productivos de acuerdo con las limitaciones y delimitaciones que posee el presente proyecto de investigación, los puntos más notables son el presupuesto, tiempo para concluir el

proyecto y el complicado almacenamiento del hidrógeno, además de tener un alto riesgo debido a las características de volatilidad e inflamabilidad del gas.

En consecuencia, a la implementación del generador de hidrógeno al motor, se necesita realizar pruebas de funcionamiento para evaluar el comportamiento en dos estudios imprescindibles, tales como empleo solamente de gasolina y de una mezcla de hidrógeno con gasolina, los ensayos a efectuar serán para analizar el rendimiento de la potencia del motor, consumo de combustible y la emisión de gases producto de la combustión.

Para el ensayo de evaluar el rendimiento del motor con un dinamómetro de rodillos, dicho instrumento permite estimar la potencia mecánica sin desmontar el motor y así medir las prestaciones de potencia y torque. La prueba de medición del consumo de combustible se llevará a cabo mediante un ciclo de conducción urbano en la ciudad de Riobamba en horas pico, también se empleará un reservorio adicional de combustible con una escala de medición volumétrica y un medidor de flujo de aire o testo para calcular el flujo másico de hidrógeno generado.

La última prueba es el ensayo de emisiones contaminantes, el cual es fundamental contar con un analizador de gases que permite realizar un diagnóstico para evaluar la cantidad de emisiones que produce el vehículo monoplace. De modo que la obtención de datos de los tres ensayos de funcionamiento permite realizar una comparación de la eficiencia del motor, consumo combustible y concentración de gases emitidos de los dos casos de estudio.

### ***1.6.3. Justificación práctica***

Al implementar el sistema de generación de hidrógeno como combustible adicional, es necesario saber cuánto hidrógeno gaseoso entra al cilindro del motor de cuatro tiempos, con el fin de evitar riesgos de inflamabilidad, lo cual permite comprender si la mezcla de hidrógeno y combustible es la prudente sin que exista alguna fuga del gas al exterior, de esta forma es viable realizar las pruebas de funcionamiento para evaluar el rendimiento del motor, consumo de combustible y emisión de gases.

En función a lo planteado, el hidrógeno como combustible capta una gran redistribución del poder económico y políticas sociales, actualmente la principal fuente de energía es el petróleo, cuyas empresas petrolíferas y el resto que tenga una relación con las actividades de extracción del crudo, quedarán inadecuadas a las circunstancias que provocarán las energías renovables en un futuro,

como lo es la económica hidrógeno, que consiste en un modelo económico energético para producir dicho elemento de manera competitiva para sustituir a los combustibles fósiles.

En el sector automotriz, el hidrógeno puede usarse para la combustión en motores como una energía portadora y pilas de combustible que convierte el hidrógeno en energía eléctrica, debido a lo complicado de almacenar y transportar dicho combustible verde, la manera más eficiente de obtener mayores resultados, es usar el hidrógeno en celdas de combustible que tiene un rendimiento 2,5 veces más que implementarlo en procesos de combustión, además, ofrece diferentes cualidades útiles en los sistemas de cogeneración de electricidad y calor. Debido a esto el hidrógeno podría tener un efecto significativo en el sector eléctrico, con la generación centralizada, este elemento permitiría almacenar la energía eléctrica, para utilizar de manera eficiente las fuentes renovables como la eólica, solar, hidráulica y biomasa, y así evitar usar baterías que ofrecen una baja autonomía en comparación a los combustibles fósiles.

### **1.7. Hipótesis**

El uso de hidrógeno como combustible suplementario en un vehículo monoplaza con un motor de combustión interna de cuatro tiempos ofrece una reducción de los gases contaminantes, otorgando una eficiencia mayor o igual de potencia y consumo energético que el de los combustibles fósiles.

### **1.8. Hipótesis nula**

La investigación sobre el análisis de la factibilidad para implementar el uso de hidrógeno como combustible suplementario en un vehículo monoplaza con un motor de combustión interna de cuatro tiempos demuestra que no es capaz de ofrecer una reducción de los gases contaminantes, ni una eficiencia mayor o igual de potencia y consumo energético que el de los combustibles fósiles.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se mencionará información relacionada a investigaciones y estudios que se realizaron con anterioridad como base para el desarrollo del presente trabajo de investigación, en cuanto al hidrógeno se hará referencia de sus características como combustible de aporte, métodos de obtención, almacenaje, transporte y distribución del hidrógeno, además, de describir el comportamiento de los motores de combustión interna alimentados con dicho combustible verde, por consiguiente se analizará la factibilidad del uso de hidrógeno como combustible adicional en un motor de cuatro tiempos de un vehículo monoplaça.

#### 2.1. Antecedentes de investigación

Aproximadamente en el siglo XVI, alquimistas habían observado que cuando el aceite vitriolo o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), aquel que actuaba sobre las limaduras de hierro, desprendía un gas combustible, de naturaleza desconocida en aquel entonces de la época. Consecuentemente el hidrógeno fue descubierto por el científico británico Henry Cavendish en 1766, en cual identifico como algo diferente del oxígeno, además, describe el agua como un compuesto de estos gases. Pero en 1785, el químico francés Antonie Lavoisier nombra al “aire inflamable” de Cavendish como actualmente se lo conoce: hidrógeno, el cual tiene como significado en griego “generador de agua”. En 1898, James Dewar licuo hidrógeno por primera vez, de manera que fue colocado en el primer grupo de la tabla periódica, no obstante, sus propiedades no tienen relación con las de aquel grupo, además, este gas es el más abundante e importante en la conformación química de la materia orgánica como elemento constituyente de diferentes moléculas.

Tras el descubrimiento del hidrógeno en aproximadamente diez años, dicho elemento ocupó un papel importante en el desarrollo de nuevas tecnologías de la época, como en la primera construcción de un generador de hidrógeno para implementar el gas en globos de reconocimiento por parte de militares franceses. La implementación del hidrógeno como combustible no es tan reciente, puesto que la tentativa más anticipada para desarrollar un motor alimentado por hidrógeno fue divulgada por W. Cecil en 1820, su trabajo que fue titulado como “En la aplicación del gas de hidrógeno para producir energía móvil en una máquina” publicado en Cambridge Philosophical Society. El motor se basa en el principio de vacío, debido a que la presión atmosférica mueve el pistón contra el vacío, el cual se generaba por la quema de una mezcla de

hidrógeno y aire, por lo que permite que se expanda y se enfrié en dicha secuencia. El motor ideado por Cecil utilizaba el hidrógeno como única fuente de energía para su combustión.

En la década de 1860 y 1870, Nikolaus August Otto (inventor del ciclo Otto), según Fàbrega (2009, pp. 106-107) informa que utilizó un producto sintético de gas para el combustible, posiblemente contenía un 50% de hidrógeno. Otto también experimentó con gasolina, pero en ese entonces consideraba que era peligroso trabajar con aquel combustible, y decidió seguir usando combustibles gaseosos. Posteriormente al desarrollo del carburador, una nueva era inició, de tal manera que la gasolina se podía usar de manera sencilla y segura, por consiguiente, disminuyó el interés por los demás combustibles.

En los años 20, el hidrógeno fue utilizado en la aviación alemana como segundo combustible para los zeppelins que cruzaban el océano Atlántico, la función del hidrógeno era mantener la fuerza de ascensión de los dirigibles. La historia del hidrógeno en la aviación llegó a fin en 1937, cuando el dirigible Hindenburg se encendió antes de aterrizar en Nueva Jersey – EE. UU., sucedió en una tormenta eléctrica pero el mundo decidió culpar al inflamable gas de hidrógeno como causa principal de la tragedia de Hindenburg. De no ser por tales acontecimientos, el ingeniero alemán Rudolph Erren, que trabajó en motor para dirigibles cuyo combustible era el hidrógeno, logrando resolver los inconvenientes de autoencendido mediante un carburador a inyección directa, la construcción de un dirigible a hidrógeno podría haber sido posible (Asensio, 2007, p. 5).

Durante el año 1950, los ingleses y alemanes continuaron sus experimentos de implementar el hidrógeno como combustible en motores de combustión interna (autos, camiones, motociclistas) y externa (maquina a vapor, turbinas de vapor), aun así, fue adquiriendo un concepto de inestabilidad y volatibilidad excesiva. En 1943, el hidrógeno tuvo otra oportunidad debido a la crisis petrolera, de tal forma que las potencias mundiales invirtieron grandes cifras de capital en investigaciones para el potencial “sustituto del petróleo”, tiempo después la crisis llegó a su fin al igual que las investigaciones de un combustible sustituto, a excepción de países como Canadá, Alemania, Japón y EE. UU. Por esta razón, específicamente en tres sectores, como la aeronáutica, aeroespacial y automoción, las investigaciones del hidrógeno como combustible adicional y/o sustituto jamás se detuvieron.

En 1992 los gobernantes e instituciones mundiales notaron los significativos problemas ligados al petróleo, carbón y gas natural, junto con la preocupación de un aire más limpio y la concepción de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Así mismo estas energías de gran explotación a nivel mundial con cierta cantidad limitada, es decir, no se regeneran o lo hacen de

una forma muy lenta en relación con la esperanza de vida humana. Estos combustibles son distribuidos por todo el planeta, produciendo una gran cantidad de energía sin olvidar que son una de las principales fuentes de contaminación atmosférica por la producción de gases contaminantes como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, entre otros. Dichos compuestos se relacionan con en el efecto invernadero, aumento de temperatura o calentamiento global, lluvias acidas, contaminantes del suelo, aire y agua. No obstante, no se parte desde cero debido a los numerosos estudios sobre el hidrógeno como combustible para que sea capaz de complementar y/o sustituir los derivados del petróleo.

Al emplear hidrógeno en procesos de combustión en motores de combustión interna o para generar energía eléctrica en pilas de combustible, tienen una aplicación muy significativa en las tareas diarias humanas, ya que una de las ventajas más notables es la abundancia del hidrógeno en el universo, además, la combustión de este solo origina calor y vapor de agua, del mismo modo, es un sistema de energía renovable ya que no contamina el medio ambiente. En contraste con las desfavorables características que presenta dicho elemento, como la alta inflamabilidad y la fabricación de instalaciones seguras para su almacenaje, producción y distribución (Cando y Quelal, 2012, pp. 2-3).

Otra aplicación significativa del hidrógeno fue en los programas espaciales, que lo han utilizado extensivamente, de modo que dispone de una relación óptima entre energía y peso en comparación a los demás combustibles. Debido a la carrera espacial entre Rusia y Estados Unidos en aquella época, se produjeron avances notables sobre la manipulación del hidrógeno, siendo en estado líquido la mejor opción para los motores espaciales, además de propulsar vehículos en las diversas misiones espaciales, incluyendo las misiones Apollo, Viking en Marte y Voyager a Saturno.

Según la investigación de Baltazar (2020, pp. 149-155), determinó que el generador de hidrógeno logra reducir en gran cantidad los gases contaminantes, en especial las emisiones de HC, el cual ayuda a disminuir la contaminación al medio ambiente y prevenir algunas enfermedades, además, otorga un 11% menos de PPM (partes por millón) comparado con el uso de únicamente gasolina, dicha evaluación se realiza mediante un analizador de gases JEVOL en un motor Volkswagen 1.5 L en estado de ralentí y aceleración. La investigación logra determinar los parámetros y cantidades que relacionan al motor con el generador de hidrógeno a través de una simulación matemática. Finalmente concluye que para producir hidrógeno se necesita demasiada energía para su almacenaje, debido a que ocupa más volumen que el oxígeno, pero posee baja masa molecular.

Según la investigación de Borja et al. (2014, pp. 55-85), en la cual declara en base a las evaluaciones realizadas en el sistema generador de hidrógeno, se obtiene un ahorro sustancial en el consumo



de combustible, es decir, que consiguió una mejora del 11% en el rendimiento de kilometro por galón. Un valor muy bajo en consideración de los nuevos vehículos híbridos que pueden obtener un 35% de ahorro de combustible. La investigación también demuestra que los productos de los sistemas generadores de hidrógeno ofertados en el mercado, lo cuales indican un ahorro de un 25 a 30% de combustibles son erróneos. Por otra parte, este tipo de generadores de hidrógeno poseen diferentes inconvenientes como: el ingreso de vapores de agua en la cámara de combustión que puede generar excesivas oxidaciones de los componentes internos, mayor deterioro de pistones, válvulas y rines, por último, para que el generador pueda realizar la electrolisis, necesita de electricidad, por lo que formaría parte de los consumidores del vehículo y requeriría de cierto porcentaje de combustible.

En la investigación realizada por Familiar (2011, pp. 70-86), manifiesta que cuando se utiliza hidrógeno como combustible adicional en un motor de combustión interna, la técnica o método de introducción del hidrógeno en el motor consiste en enriquecer el aire mediante un carburador de tipo Venturi/gas, el mismo que puede ser inyectado de forma directa por el conducto de admisión usando los inyectores, lo cual reduce parcialmente la producción de óxidos de carbono debido a que el hidrógeno no contiene carbono, las pruebas realizadas en un motor de hidrógeno no generaron emisiones significantes de CO y CO<sub>2</sub> en su combustión, pero si la emisiones de NO<sub>x</sub>, estas suelen aumentar notablemente, no obstante se puede reducir dichas emisiones con cuatro método, como: la introducción de terceras sustancias (dietiléter), reajuste de los componentes electrónicos de inyección, recirculación de gases de escape y reducción catalítica selectiva.

La investigación realizada por León (2019, pp. 27- 41), concluye que los motores de combustión interna que funcionan con un generador de hidrógeno disminuyen en un 51,98% la emisión de hidrocarburos (HC) pero al estar sometido a un incremento en las explosiones por la mezcla de combustible con hidrógeno, respecto a los componentes mecánicos, estos estarán sometidos a un mayor desgaste para el cual no fueron diseñados en especial las piezas móviles como la biela, pistón y cigüeñal, por lo que es necesario tener una óptima lubricación, además, un inconveniente significativo, es la electricidad que se consume para mantener activo el generador de hidrógeno, lo cual resultar un carga adicional al alternador, por ende también consume más gasolina.

## **2.2. Marco legal**

Los principales estándares y códigos técnicos de nivel internacional que regulan una serie de comparaciones básicas sobre el valor del hidrógeno, se realiza un énfasis de los estándares con una gran relevancia internacional sobre dicho elemento, cuyos aspectos a tratar son: seguridad de

diseño, construcción, operación y calidad del producto. De otro modo, no existe un estándar enfocado en la producción de hidrógeno a partir de una fuente de energía primaria o de origen determinado para su obtención. En la tabla 2-1 se muestran los estándares más significativos, los mismos que son agrupados en diferentes categorías con respecto a la cadena de valor que tiene el hidrógeno como combustible (GIZ Fichtner, 2022, pp. 22-30).

**Tabla 2-1:** Grupo de estándares relevantes internacionales para la regulación del hidrógeno

Grupo	Código/Estándar	Título
Sistemas de hidrógeno	NFPA 2	Hydrogen technologies Code
Sistemas de tubería	ASME B31.12	Hydrogen piping and pipelines
Fisuras de metales por hidrógeno	EN 10229	Evaluation of resistance of steel products to hydrogen-induced cracking (HIC)
Reformación	EIGA Doc 155/09/E	Best available techniques for hydrogen production by steam methane reforming
Seguridad hidrógeno líquido	CGA P-28	OSHA Process Safety Management and EPA Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems
Contenedores hidrógeno líquido	CGA P-28	Cryogenic vessels -Gas/material compatibility
Contenedores transportables	EN 1797	Cryogenic vessels -Gas/material compatibility
Hidruros metálicos	ISO 11114	Transportable gas cylinders —Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents
Estaciones de tanqueo	ISO 16111	Transportable gas storage devices —Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
Calidad del combustible de hidrógeno	EIGA Doc 15/06	Gaseous Hydrogen Stations
	ISO 19880	Gaseous hydrogen —Fuelling stations
Calidad del combustible de hidrógeno	ISO 14687	Hydrogen fuel quality —Product specification

**Fuente:** (GIZ Fichtner, 2022, p. 22)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

La estructura normativa que favorece e incentiva la implementación del hidrógeno en Ecuador es prácticamente inexistente. En el año 2005, se estableció una iniciativa que consiste en una propuesta de ley para incentivar los estudios, desarrollo, producción y uso del hidrógeno, con la finalidad de emplearlo como combustible y fuente de energía, dicha propuesta tuvo un escaso desarrollo, en otras palabras, la ausencia de instrumentos legales que impulsen el desarrollo del hidrógeno en la normativa ecuatoriana, no es exclusiva del país, puesto que en México y Argentina que fomentan e incluyen iniciativas para realizar estudios sobre energías renovables como el hidrógeno, en ningún país de Sudamérica se ha manifestado la implementación de leyes, normas y decretos sobre la inclusión del hidrógeno en el sistema energético (Posso y Sánchez, 2014, p. 2).

## **2.3. Referencias teóricas**

### **2.3.1. Fuentes de energías**

#### *2.3.1.1. Fuentes de energías renovables*

Las energías renovables son aquellas que se encuentran de forma natural y gran cantidad, porque son capaces de regenerarse, además, de no producir gases de efecto invernadero causantes principales del cambio climático. También son fuentes de energía inagotables o ilimitadas debido a que no agotan a pesar de consumo, ya que dichas energías provienen de recursos naturales de libre disposición. Entre ellas se encuentran la:

- Bioma
- Eólica
- Mareomotriz
- Geotérmica
- Solar
- Hidráulica
- Biocombustible

#### *2.3.1.2. Fuentes de energías no renovables*

Las energías no renovables son aquellas que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y no son capaces de regenerarse o lo hacen de forma muy lenta en relación con la esperanza de vida humana, además producen gases contaminantes de gran impacto muy perjudicial para el medio ambiente.

Según Sáinz (2014, pp. 1-4) los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda mundial de energía primaria, y el sistema energético es la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. Los gases de efecto invernadero tienen la capacidad de emitir y acumular calor, por lo que el aumento de gases nocivos para el medio ambiente provoca un incremento significativo de la temperatura en el planeta.

### **2.3.2. El Hidrógeno y sus características**

A través de los años el hidrógeno se ha ido estableciendo como una alternativa de combustible de bajo impacto con el medio ambiente, capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que

cualquier otro combustible conocido, con un valor de 33,3 kWh por kg con respecto al 13,9 kWh del gas natural o los 12,4 kWh del petróleo, lo cual es confirmado por Asensio (2007, pp. 8-9).

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y es el átomo más ligero, en condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, inodoro e insípido, tiene propiedades físicas y químicas que los diferencian del resto. Se encuentra en la naturaleza combinado con otros compuestos como el agua (H<sub>2</sub>O) y se obtiene a través de distintos procedimientos entre ellos la electrolisis de agua.

### 2.3.2.1. Propiedades físicas

El hidrógeno en estado natural es un gas inodoro, incoloro e insípido conformado por moléculas diatómicas (H<sub>2</sub>), el átomo de hidrógeno tiene la simbología de H. Este elemento es uno de los principales compuestos que conforman el agua y la mayor parte de la materia orgánica, se encuentra distribuido ampliamente por todo el universo, en la tabla 2-2 se describe las principales propiedades físicas de dicho elemento.

**Tabla 2-2:** Propiedades físicas del hidrógeno H<sub>2</sub>

Propiedades físicas	Hidrógeno	Unidad
Numero atómico	1	-
Valencia	1	-
Estado de oxidación	+1	-
Masa atómica	1,00797	g/mol
Densidad	0,0899	Kg/m <sup>3</sup>
Punto de fusión	14,025	K
Punto de ebullición	20,268	K
Punto de inflamabilidad	255	K
Entalpia de evaporización	0,8995	kJ/mol
Entalpia de fusión	0,1180	kJ/mol
Presión de vapor	209	Pa
Punto critico	23,87	K
Volumen molar	22,42*10 <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> /mol

**Fuente:** (Cando y Quelal, 2012, pp. 25-26)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 2.3.2.2. Propiedades químicas

Como es el primer elemento de la tabla periódica cada átomo de hidrógeno posee un protón en su núcleo atómico, a la vez es el elemento químico más ligero que existe, donde su átomo está formado por un protón y electrón, las propiedades químicas más relevantes del hidrógeno son:

- Posee tres isótopos naturales, conocidos como protio, deuterio y tritio. No obstante, en condiciones de laboratorio han logrado sintetizar cinco isótopos adicionales.
- Las combinaciones con metales alcalinos y alcalinotérreos excepto Be y Mg, son esencialmente enlaces iónicos.
- Con los no metales son enlaces del tipo covalente.
- El H<sup>+</sup>, salvo en el estado gaseoso, en la química siempre se encuentra asociado, por ejemplo: H<sub>3</sub>O (catión oxonio).
- Tiene una estructura cristalina hexagonal.
- Soluble en agua y la solubilidad no es afectada por la temperatura.
- El hidrógeno reacciona con la mayoría de los elementos

### 2.3.2.3. Contenido energético

Las características más relevantes en la utilización del hidrógeno es la equivalencia en términos de energía, en la tabla 2-3 se registran valores de referencia, los cuales son calculados basándose en el poder calorífico inferior (PCI) del hidrógeno. Además, para una mejor comprensión del contenido energético, es necesario comparar el hidrógeno con otros diferentes tipos de combustibles, los cuales se detallan en la tabla 2-4 en base al PCI.

**Tabla 2-3:** Equivalencias entre hidrógeno y energía

Masa H <sub>2</sub> [kg]	H <sub>2</sub> gas [Nm <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> líquido [litros]	Energía [MJ]	Energía [kW·h]
1,00000	11,12000	14,12000	120,00000	33,33000
0,08990	1,00000	1,27000	10,80000	3,00000
0,07080	0,78800	1,00000	8,49500	2,35900
0,00833	0,09260	0,11770	1,00000	0,27800
0,03000	0,33300	0,42400	3,60000	1,00000

Fuente: (Ricón, 2014, p. 14)

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

**Tabla 2-4:** Equivalencias (valor energético) entre hidrógeno y otros combustibles

Combustible Equivalencia	H2	Gasolina (l)	Gasóleo (l)	Metano (g)	Gas Natural (g)	Butano (g)	Metanol (l)
En peso [kg]	1,00000	2,78000	2,80000	2,40000	Entre 2,54000 y 3,14000	2,59000	2,62000
En volumen [l] respecto H2 - líquido	1,00000	0,26800	0,23600	-	-	-	-
En volumen [l] respecto H2 – gas (350 bar)	1,00000	0,09650	0,08500	0,24000	Entre 0,30000 y 0,35000	0,11700	0,12700

Fuente: (Ricón, 2014, p. 15)

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 2.3.3. Obtención de Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento de gran abundancia en planeta Tierra, sin embargo, no se encuentra de forma directa en la naturaleza, sino que suele estar combinada con otros elementos como los hidrocarburos y agua, por lo que se debe generar a partir de procesos químicos para obtener hidrógeno puro. El proceso de extraer hidrógeno de combustibles fósiles se denomina reformado de hidrocarburos, un método poco costoso, pero genera sustancias contaminantes para el medio ambiente. En cambio, el proceso de extraer hidrógeno del agua, el cual se llama electrolisis de agua, un método más limpio, pero requiere de grandes cantidades de energía eléctrica.

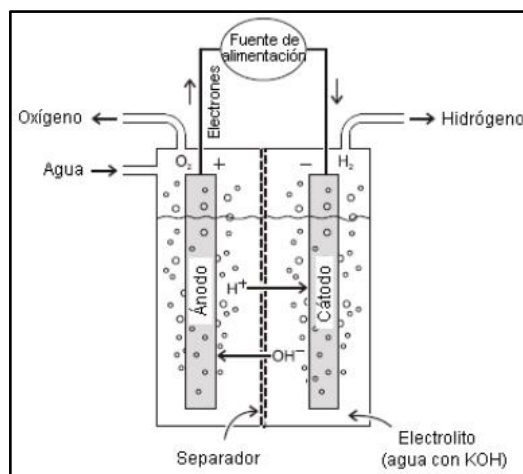
En la actualidad, la mayor parte de hidrógeno producido en todo el mundo se obtiene de los combustibles fósiles en las industrias a través de procesos químicos o a partir de los procesos de refinado de petróleo. La producción de hidrógeno tiene un valor de 3 a 15 veces más que el gas natural y entre 1,5 a 9 veces más que la gasolina, dependiendo el método utilizado (Fábrega, 2009, pp. 66-86).

#### 2.3.3.1. Electrolisis del agua

La electrolisis del agua es un método más limpio para la obtención de hidrógeno comparado con el reformado de hidrocarburos, a su vez es considerado un proceso preferido para la obtención pura de hidrógeno para llevar a cabo este proceso se requiere de una gran cantidad de energía que puede ser calorífica o eléctrica. La electrolisis del agua consiste en contener en recipiente la

sustancia a electrolizar o electrolito, además se sumergen dos electrodos que serán los conductores eléctricos llamados también ánodo (polo positivo) y cátodo (polo negativo) que se conectan a una fuente de corriente directa.

La corriente eléctrica de la batería realiza un flujo de electrones que va al ánodo dejándolo con carga positiva y luego pasa cátodo dejándolo con carga negativa, el agua es una molécula polar ya que tiene un polo positivo y negativo entonces como el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno es más probable que los electrones que poseen carga negativa estén más cerca del átomo de oxígeno, lo que provoca que cada átomo de hidrógeno tenga una carga positiva, esta atracción de las moléculas con los polos se denomina enlace o puente de hidrógeno.



**Ilustración 2-1:** Electrolisis del agua

**Fuente:** (Fábrega, 2009, p. 68).

### 2.3.3.2. Reformado de hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de hidrógeno y carbono, el reformado es un proceso químico en el cual reacciona el hidrógeno contenido en los combustibles con la presencia de vapor, oxígeno o ambos. La composición específica del reformado depende del combustible fuente y del proceso utilizado, además tiene otros componentes como nitrógeno, dióxido de carbono y combustible sin reformar, cuando el hidrógeno se extrae del reformado, la mezcla restante se denomina refinado.

El 96% del hidrógeno producido se obtiene de combustibles fósiles principalmente a partir del reformado por vapor del gas natural. Además, el 95% de la producción de hidrógeno es cautiva, es decir, lo produce la propia instalación que lo va a consumir, sin necesidad de una red de distribución a usuarios finales según Familiar (2011, pp. 70-82). Es decir, el hidrógeno extraído por

combustibles fósiles se obtiene mediante reformado por vapor, gasificación del carbón y pirolisis (degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno).

#### 2.3.3.3. *Descomposición termoquímica del agua*

En la descomposición termoquímica del agua solo la energía se utiliza para descomponer el agua, a diferencia de la electrolisis, debido a que en este procedimiento la única energía agregada es en forma de calor y no en energía eléctrica. Los reactivos químicos que se utilizan para descomponer el agua mediante varias reacciones siguiendo la secuencia que se presenta a continuación:

- Producción de oxígeno.
- Producción de hidrógeno.
- Regeneración de los materiales.

La elección de compuestos específicos para la serie de reacciones depende de los siguientes factores:

- Cantidad de energía necesaria.
- Estabilidad de los reactivos.
- Capacidad de que cada producto de una secuencia reaccione fácilmente con la siguiente.
- Tiempo de reacción.
- Cantidad de reacción
- Temperatura individual de cada reacción.
- Requerimientos de presión y flujo.
- Numero de pasos.
- Composición de los residuos.

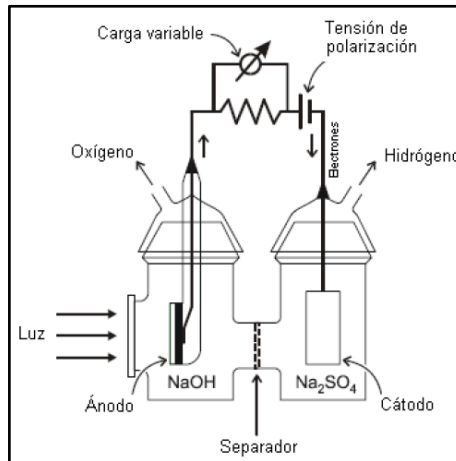
La descomposición termoquímica del agua como en la electrolisis, es una energía renovable y amigable con el medio ambiente, si el calor no aprovechable se utiliza en otros procesos, el hidrógeno derivado aumentará la eficacia total del proceso de generación de calor primario, si el calor se consigue mediante la combustión de combustibles fósiles el hidrógeno derivado habrá generado probablemente más contaminación de que lo que hubiese generado si se quema el combustible de forma directa.

#### 2.3.3.4. *Foto electrolisis*

La foto electrolisis es un proceso de electrolisis en la cual la electricidad necesaria para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno es generada directamente usando energía solar. El proceso más usado utiliza una serie de células, cada una de ellas con un par de foto electrodos semiconductores sumergidos en un electrolito acuoso y separados por una membrana que



posibilita la transferencia de iones, pero evita la mezcla de gases. El cátodo se compone un material semiconductor con un exceso de protones, mientras que el ánodo se realiza de un material semiconductor con un exceso electrones.



**Ilustración 2-2:** Foto electrolisis

**Fuente:** (Fàbrega, 2009, p. 85)

Cuando el ánodo recibe la radiación solar, los electrones absorben la energía luminosa y la hacen pasar a través de un circuito externo hasta el cátodo. Esto crea un par de huecos de electrones, el hueco positivo reacciona con el agua para crear los iones de hidrógeno positivos y oxígeno gaseoso, los iones de hidrógeno atraviesan por la membrana para recombinarse con los electrones en el cátodo, obteniendo gas de hidrógeno. Este sistema tiene una eficiencia de entre el 8% y 12%.

#### 2.3.3.5. Producción a partir de biomasa

El hidrógeno se puede producir a partir de la descomposición de la biomasa, es el combustible energético que se obtiene directa o indirectamente desde recursos biológicos. Al utilizar biomasa como fuente de producción de hidrógeno, y se puede producir de la siguiente manera:

- Gasificación de la biomasa: se trata de someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700°C a 1.200°C de temperatura, el producto resultante es un combustible gaseoso conformado por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.
- Pirolisis: es la descomposición de la biomasa en ausencia de oxígeno a una temperatura de 500°C, de esta combustión se obtiene carbón vegetal y una mezcla de monóxido de carbono, hidrocarburos ligeros y dióxido de carbono.

### 2.3.3.6. *Procesos industriales*

El hidrógeno puede obtenerse a través de subproductos de algunos procesos industriales, como:

- Un subproducto de la producción de clorina y de policloruro de vinilo.
- Un subproducto de la producción de hidróxido de sodio.
- Producido en otros gases ligeros de refinerías de crudo.
- Producido a través del carbón y en procesos químicos de deshidrogenación.

### 2.3.4. *Almacenaje, Transporte y Distribución del Hidrógeno*

Unos de los mayores desafíos al utilizar hidrógeno es su almacenamiento, esto se debe por parte a su naturaleza explosiva del combustible, y por otro lado a la presión que se contiene el hidrógeno en un recipiente en estado gaseoso. El hidrógeno se lo puede almacenar en estado sólido, líquido o gaseoso y se representa con las siguientes denominaciones:

- LH<sub>2</sub> para el hidrógeno en estado líquido (liquid hydrogen)
- CGH<sub>2</sub> hidrógeno gaseoso comprimido (compressed gaseous hydrogen)
- LCGH<sub>2</sub> hidrógeno líquido a gas comprimido (liquid to compressed hydrogen)

El hidrógeno dispone de la relación energía – peso, más elevada que cualquier otro combustible por lo que la mayoría de los tanques de almacenaje tiene un alto peso.

#### 2.3.4.1. *Estado gaseoso*

Es la forma más sencilla para almacenar hidrógeno a compresión, se puede almacenar a 200 bar con un consumo del 10% de la energía almacenada y mediante equipos avanzados se puede llegar a almacenar a 700 bar con un consumo del 15% de la energía almacenada. Los tanques usados para almacenar el gas de hidrógeno a alta presión (CGH<sub>2</sub>) se pueden dividir en:

- Tipo I: son tanques de metal (acero o aluminio) que admiten hasta una presión de 200 bar para el acero y de 175 bar para el aluminio.
- Tipo II: son metálicos reforzados por unos filamentos generalmente de fibra de vidrio que puede resistir presiones de hasta 263 bar y a carbono pueden soportar presiones de hasta 299 bar.
- Tipo III: fabricado por materiales compuestos (carbono, fibra de vidrio o kevlar) y una pequeña capa metálica con el fin de evitar fugas, en carbono pueden soportar presiones de hasta 305 bar y en fibra de vidrio – kevlar hasta presiones de 438bar.
- Tipo IV: fabricado totalmente de materiales compuestos y es el más ligero de todos, pero presenta difusividad del hidrógeno a través del polímero.

#### 2.3.4.2. Estado líquido

Para el almacenamiento líquido del hidrógeno se debe enfriar su licuación hasta los  $-253^{\circ}\text{C}$  a presión ambiente y mantenerse en tanques criogénicos especiales, a esta temperatura hace que su manipulación sea difícil, un aumento de presión puede producir pérdidas por sobrepresión, esta forma es la más usada por industrias. La parte fundamental de la tecnología de los tanques de hidrógeno es el aislamiento, el cual está formado por varias capas de vacío que se encuentra separadas por otras capas de fibra. Por otra parte, el aislamiento de los tanques permite que el hidrógeno se conserve en estado líquido hasta diez días antes de expulsar cierta cantidad del combustible, de continuar así, la pérdida diaria es del 1 al 2% de su capacidad neta (De Troya et al., 2016, pp. 9-14).

El hidrógeno en proceso de licuefacción para cambiar de estado gaseoso a líquido requiere de entre 30 o 40% del contenido energético del hidrógeno licuado, además, el proceso de cambio de estado es tecnológicamente complejo. Del mismo modo, el almacenaje del hidrógeno no puede permanecer en estado líquido de forma indefinido, sin importar el buen aislamiento del tanque, el calor del ambiente se transfiere al tanque. Normalmente los tanques de almacenaje de hidrógeno líquido estacionario que poseen una forma esférica, dado que dicha forma geométrica ofrece la menor área superficial de acuerdo con su determinado volumen.

#### 2.3.4.3. Estado sólido

El hidrógeno se puede almacenar en materiales diseñados como portadores de hidrógeno, estos son elevados en peso y volumen. Además, se almacena en estado sólido en materiales mediante distintos mecanismos como la absorción y adsorción, dichos mecanismos se describen de la siguiente manera:

- Adsorción: el hidrógeno se une directamente a la superficie del material por lo que estos deben tener una porosidad alta.
- Absorción: consiste en la disociación de los átomos de hidrógeno y su incorporación en la red de sólido en el interior del material, usados para los hidruros metálicos reversibles, hidruros complejos y sistemas de nitrógeno.

El hidrógeno normalmente se almacena en estado sólido mediante hidruros metálicos, que son combinaciones de aleaciones metálicas que se encargan de absorber el hidrógeno, para almacenar grandes cantidades del combustible verde se emplean tanques que contienen metal granulado, los mismos que absorben y liberan hidrógeno mediante el empleo de calor a los hidruros metálicos (Cando y Quelal, 2012, pp. 60-67).

#### 2.3.4.4. Otros métodos de almacenaje

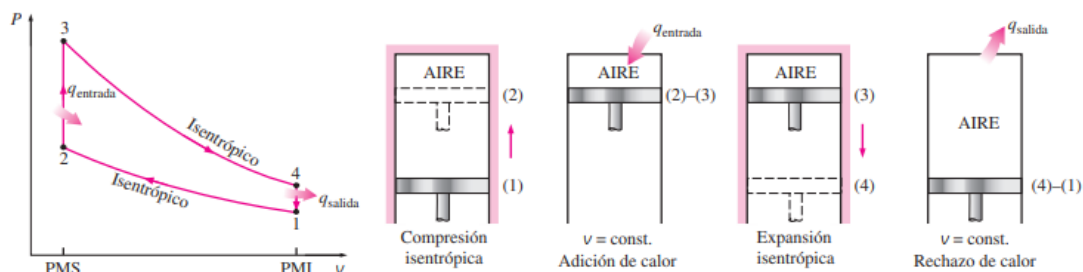
Existe un conjunto de procesos o métodos alternativos de almacenaje de hidrógeno, no obstante, las investigaciones siguen desarrollándose, además, no resulta factible en el sector comercial, entre dichos métodos se encuentran los siguientes:

- Hidruros metálicos
- Microesferas de cristal
- Oxidación de hierro

#### 2.3.5. Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna es un tipo de maquina termodinámica formada por piezas, mecanismo fijos y móviles, que transforma la energía química de un combustible en energía mecánica o movimiento, en este tipo de motores el proceso de combustión se produce en el interior de los cilindros o cámaras de combustión. Los elementos y funcionamiento del motor de combustión interna se detallan en los siguientes apartados:

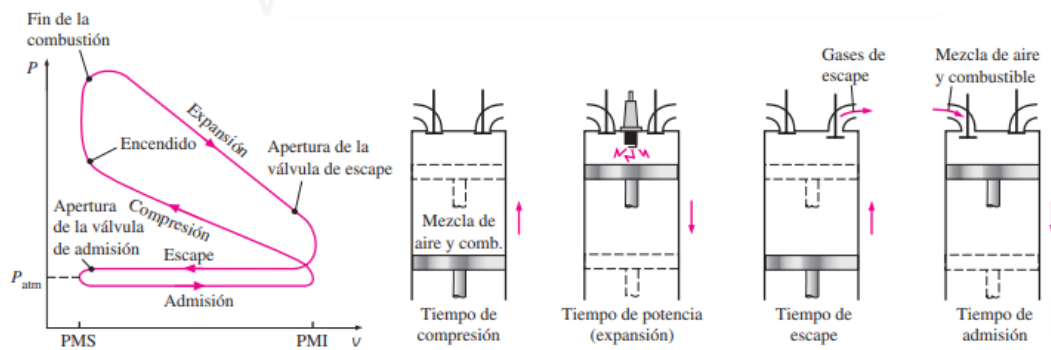
##### 2.3.5.1. Ciclo Otto



**Ilustración 2-3:** Ciclo ideal de un motor de combustión interna 4 tiempos

Fuente: (Çengel y Boles, 2006, p. 494).

Los motores de combustión interna ciclo Otto pueden ser de dos tiempos o de cuatro tiempos, este último es más utilizado en vehículos. El rendimiento térmico de los motores modernos de ciclo Otto presentan limitaciones por pérdidas de bombeo, fricción, mecánicas, entre otras. El funcionamiento del motor para todos los cilindros es el mismo en el interior de la cámara de combustión con sus respectivos cuatro tiempos.



**Ilustración 2-4:** Ciclo real de un motor de combustión interna 4 tiempos

**Fuente:** (Çengel y Boles, 2006, p. 494)

Ciclo Otto ideal para motores de combustión interna:

1. Admisión: inicia cuando el pistón se encuentra en el PMS (punto muerto superior), la válvula de admisión se encuentra abierta y la de escape cerrada, el movimiento descendiente del pistón del PMS al PMI (punto muerto inferior) crea un efecto de succión que hace ingresar una mezcla a la cámara de combustión. El cigüeñal ha girado 180 grados y el árbol de levas 90 grados.
2. Compresión: cuando el pistón llega al PMI la válvula de admisión se cierra, al subir hasta el PMS se reduce el volumen en la cámara de combustión comprimiendo la mezcla. El cigüeñal ha dado 360 grados o una vuelta y el árbol de levas 180 grados.
3. Explosión: al comprimirse la mezcla por completo o cuando el pistón ha subido hasta el PMS mientras las válvulas de admisión y escape están cerradas, la bujía crea una chispa que quema la mezcla, la explosión generada empuja el pistón hacia el PMI. El cigüeñal ha completado un giro de 540 grados y el árbol de levas ha completado 270 grados.
4. Escape: cuando el pistón llega al PMI la válvula de escape se abre, mientras el pistón sube hasta el PMS este realiza la expulsión de los gases resultantes de la explosión. El cigüeñal ha dado 720 grados o dos vueltas y el árbol de levas 360 grados o una vuelta.

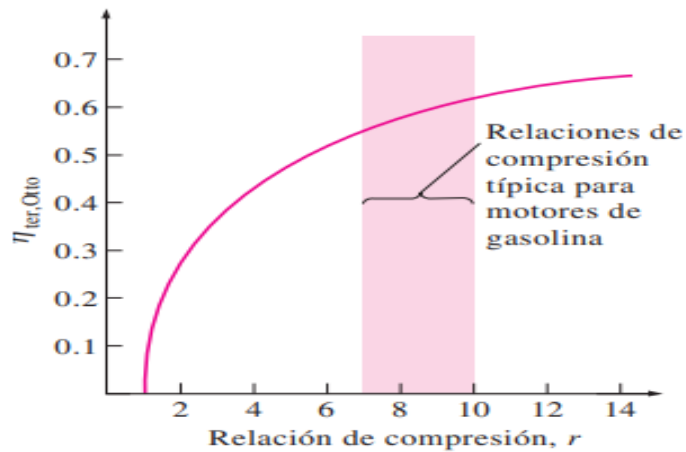
Suponiendo una calidad de aire estándar las condiciones de operación en un ciclo Otto ideal se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

- **1 - 2** Compresión isentrópica
- **2 - 3** Adición de calor a volumen constante
- **3 - 4** Expansión isentrópica
- **4 - 1** Rechazo de calor a volumen constante

### 2.3.5.2. Eficiencia del ciclo Otto

La eficiencia térmica de un ciclo Otto ideal depende de las siguientes relaciones: compresión de la máquina y calores específicos del fluido de trabajo. Para una relación de compresión dada, la eficiencia térmica de una máquina real de encendido por chispa será menor que la de un ciclo ideal Otto debido a otros factores como la fricción y combustión incompleta.

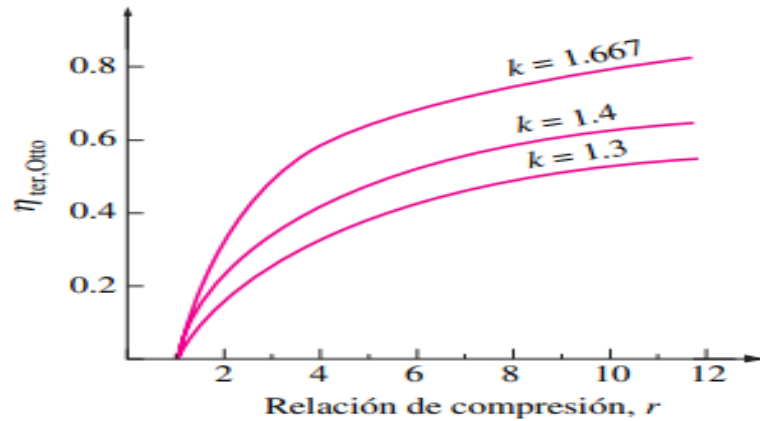
La eficiencia térmica de un ciclo Otto ideal como una función de la relación de compresión, ( $k=1,4$ ) curva de eficiencia está más inclinada a relaciones de compresiones bajas pero se nivela a partir de un valor de relación de compresión de 8 como se muestra en la ilustración 2-5, el autoencendido en las máquinas de encendido por chispa no puede tolerarse debido a que disminuye el desempeño, las mejores eficiencias térmicas (cerca de 12) sin que se produzca el autoencendido ha sido a través de una mezcla de gasolina con antidetonante.



**Ilustración 2-5:** Eficiencia térmica de un ciclo ideal Otto

Fuente: (Çengel y Boles, 2006, p. 497).

Un parámetro que afecta la eficiencia térmica del ciclo Otto ideal es la relación de calores específicos  $k$ , esta relación disminuye cuando las moléculas del fluido de trabajo son más grandes. En la ilustración 2-6 se presenta las relaciones de calores específicos  $k$  en un ciclo Otto.



**Ilustración 2-6:** Eficiencia térmica de un ciclo ideal Otto con las relaciones de calores específicos.

**Fuente:** (Çengel y Boles, 2006, p. 497)

### 2.3.5.3. Poder calorífico del combustible

El poder calorífico del combustible es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente.

$$\eta_{\text{combustión}} = \frac{Q}{HV} = \frac{\text{cantidad de calor liberado durante la combustión}}{\text{poder calorífico del combustible quemado}} \quad (1)$$

Una eficiencia de combustión del 100% indica que el combustible se quema completamente y los gases residuales salen de la cámara de ignición a temperatura ambiente, la mayoría de los combustibles contienen hidrógeno que durante su combustión forman partículas de agua. Si el agua sale como vapor se denomina poder calorífico inferior o LHV (lower heating value) y si el agua se condensa es poder calorífico o HHV (higher heating value)

### 2.3.5.4. Gasto del aire

En un motor de combustión, la mezcla del combustible y aire debe tener una proporción adecuada para su rendimiento óptimo, por lo que se da la relación de 14,7 partes de aire por una de carburante. La mezcla de aire-combustible con esa relación facilita que los hidrocarburos reaccionen con el oxígeno de forma idónea y la combustión sea completa, pero esto se da en teoría pues las condiciones de un ciclo ideal no se dan en un ciclo real de funcionamiento del motor.

Un factor lambda se emplea para referirse a la proporción usadas en la combustión, a continuación, se detalla la proporción de este factor:

- Si  $\lambda=1$ , es una mezcla estequiométrica en donde la relación de aire-combustible permite una combustión completa teóricamente.
- Si  $\lambda>1$ , es una mezcla pobre en donde la cantidad de aire es mayor con respecto al combustible.
- Si  $\lambda<1$ , es una mezcla rica en donde la cantidad de combustible es mayor con respecto al aire, esto logra una mayor potencia, pero mayor consumo y emisión de gases.

#### 2.3.5.5. Parámetros efectivos

- Potencia efectiva  $N_e$

$$N_e = \frac{tV_h * pme * n}{0.507 * \tau} \quad (2)$$

Donde:

$tV_h$  es la cilindrada total

$n$  numero de revoluciones por segundo

$\tau$  numero de ciclos de trabajo

- Par efectivo  $T_e$

$$T_e = \frac{N_e}{2 * n * \pi} \quad (3)$$

- Trabajo efectivo  $W_e$

$$W_e = \frac{N_e}{i * n} \quad (4)$$

#### 2.3.5.6. Parámetros de pérdidas mecánicas

- Potencia absorbida por pérdidas mecánicas, la cual se relaciona con las pérdidas en el cigüeñal y pistón.

$$N_{pm} = N_i - N_e \quad (5)$$

- Trabajo de pérdidas mecánicas. - es la diferencia del trabajo indicado y el trabajo efectivo.

$$N_{pm} = N_i - N_e \quad (6)$$

Las pérdidas de energías mecánicas hacen referencia a

- Pérdidas de fricción.



- Perdidas de bombeo.
- Perdidas por accionamiento auxiliares.

### ***2.3.6. Motores de hidrógeno***

Posteriormente a la descripción de las propiedades y de los diferentes procesos de obtención, almacenaje, transporte y distribución del hidrógeno, en consecuencia, se explicará sobre la aplicación de dicho elemento en motores de combustión interna, previamente a sus especificaciones sobre del ciclo Otto, eficiencias, entalpías, poder calorífico y parámetros de pérdidas mecánicas. Luego se pasará a explicar los aspectos que caracterizan a los motores que son alimentados por el factible combustible del futuro.

#### *2.3.6.1. Propiedades del combustible de hidrógeno*

- Amplia gama de inflamabilidad: el hidrógeno presenta una amplia gama de inflamabilidad en comparación con el resto de los combustibles.
- Baja energía de ignición: la cantidad de energía que requiere el hidrógeno para prenderse es mucho menor que la gasolina.
- Pequeña distancia de apagado: las llamas de hidrógeno circulan más cerca de las paredes del cilindro que otros combustibles.
- Temperatura de autoignición elevada: el hidrógeno dispone de una autoignición relativamente elevada, muy importante en la determinación de la relación de compresión.
- Alta velocidad de llama: en condiciones estequiométricas el hidrógeno en un motor de combustión interna se acerca más al ciclo termodinámico ideal.

#### *2.3.6.2. Problemas y soluciones de pre encendido*

La ignición prematura es un problema en un motor de combustión interna alimentado con hidrógeno debido a un mayor rango de inflamabilidad y una menor distancia de apagado. Una solución entre muchas consiste en reducir el volumen de la cámara de combustión sin variar la superficie de forma significativa, con esto los gases residuales se enfrían más rápido por lo cual aumenta la relación de compresión, de esta manera se podrá ahorrar combustible y disminuirá las pérdidas por calor en el funcionamiento (Fàbrega, 2009, pp. 114-115).

Otra alternativa es utilizar una válvula EGR (exhaust gas recirculation) para la recirculación de los gases de escape, como su nombre lo indica, esta permite que recircule una pequeña cantidad

de los gases de escape dentro del colector de admisión lo que ayuda a una reducción de la temperatura en la cámara de combustión, pero al utilizar este sistema EGR se tiene un menor rendimiento del motor.

#### 2.3.6.3. Evolución técnica de los motores de gasolina a hidrógeno

Al utilizar hidrógeno en un motor de combustión interna se ha requerido ciertas modificaciones para aprovechar los beneficios que aporta este gas, a continuación, se detallan algunas de estas modificaciones:

- Control del aceite del motor: uno de los motivos al utilizar hidrógeno es la reducción de gases contaminantes por tal motivo se requiere reducir el uso de aceite o en tal caso uno más adecuado para su funcionamiento.
- Culata y refrigeración: al usar hidrógeno tenemos una baja energía de ignición y amplio margen de inflamabilidad, en donde se debe evitar que las zonas de la cámara de combustión lleguen a temperaturas muy elevadas, por ello se debe incrementar el flujo de refrigerante, además aumentar superficialmente la resistencia al desgaste.
- Sistema de ignición: debido a la facilidad de ignición del hidrógeno se requiere de bujías denominadas como frías, las cuales son capaces de transferir el calor rápidamente desde el exterior a la cabeza del pistón, facilitando que la punta de la bujía logre una ignición reducida.

#### 2.3.6.4. Eficiencia térmica

Mientras mayor sea la relación de compresión y relación de calores específicos, mayor será el rendimiento termodinámico teórico del motor. Cuando menos sea la complejidad de la estructura molecular mayor será la relación de calores específicos, el hidrógeno posee  $\gamma = 1,4$  por lo que tiene una estructura más simple que la gasolina de  $\gamma = 1,1$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}} \quad (7)$$

Donde:

$\frac{V_1}{V_2}$  es la relación de compresión

$\gamma$  es la relación de calores específicos

### 2.3.6.5. Emisiones

Los óxidos de nitrógeno se crean debido a las altas temperaturas en la cámara de combustión además provoca que el oxígeno se combine con una parte de nitrógeno, esto depende de:

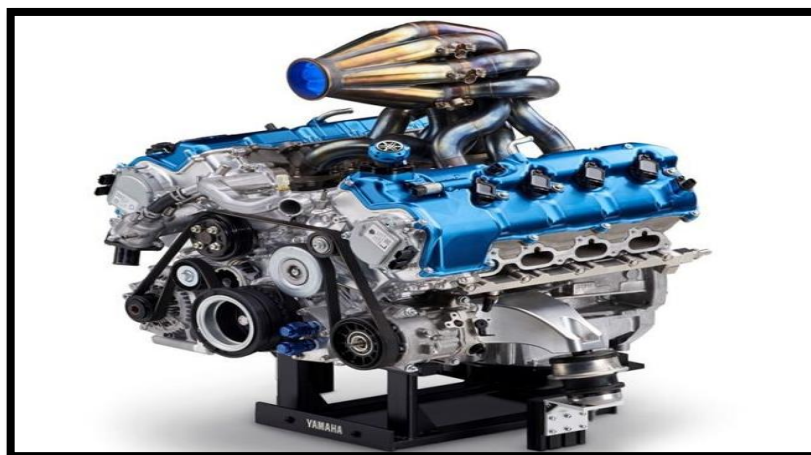
- La relación de aire-combustible.
- La relación de compresión del motor.
- Regulación de encendido.
- Velocidad del motor.

Dependiendo de las condiciones del motor aun utilizando hidrógeno, este puede producir emisiones significativas de NOX y monóxido de carbono, debido al filtrado de aceite dentro de la cámara de combustión y la relación de aire-combustible.

### 2.3.6.6. Potencia obtenida

La potencia obtenida en un motor de combustión interna usando hidrógeno depende de la relación de aire-combustible y del sistema de inyección, entonces dependiendo de la forma del ingreso del combustible a la cámara de combustión se tendrá la potencia máxima de salida, a diferencia de los motores de combustión interna convencionales, ya que este sistema está diseñado a funcionar con dos veces más aire del teóricamente requerido para producir una combustión completa, disminuyendo la emisión de gases contaminantes pero también una disminución de la potencia del motor por lo que generalmente estos son un pocos más grandes para compensar esta desventaja.

### 2.3.6.7. Configuración de los motores de hidrógeno



**Ilustración 2-7:** Motor adaptado para que funcione con hidrógeno

Fuente: (Prego, 2022).

- Motor de cuatro tiempos

A diferencia de un motor convencional, para este tipo de motores se adaptó válvulas adicionales para la admisión del hidrógeno, las diferencias son las siguientes utilizando el mismo motor:

**Tabla 2-5:** Comparación de un motor BMW convencional y con hidrógeno

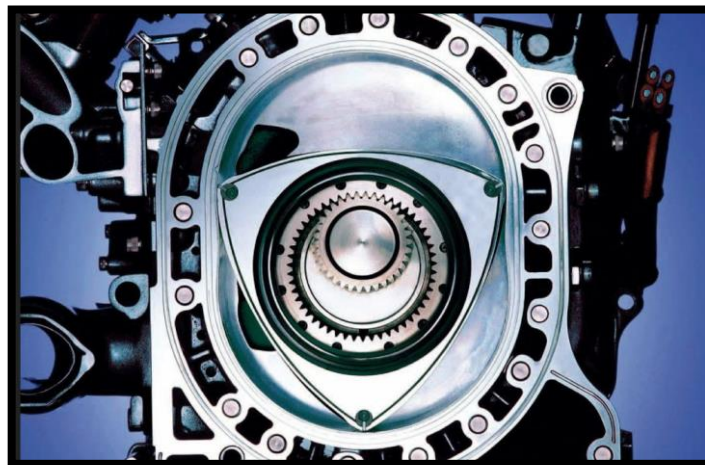
<b>Rendimiento</b>	<b>BMW 750il</b>	<b>BMW 750hl</b>
Velocidad máxima	250	226
Aceleración 0-100 km/h	6,8	9,6
Aceleración 0-100 m/s	26,7	26,1

**Fuente:** (Fàbrega, 2009, pp. 127-128)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

- Motor rotativo Wankel

En este tipo de motor se obtiene buenos resultados al emplear hidrógeno, debido a su propia configuración del motor que minimiza las dificultades de combustión, no presenta problemas de pre encendido ya que la entrada, compresión y combustión del hidrógeno se da en distintas partes, de manera que la cámara de combustión permanece más fría, evitando el retroceso de llama.



**Ilustración 2-8:** Motor rotativo Wankel

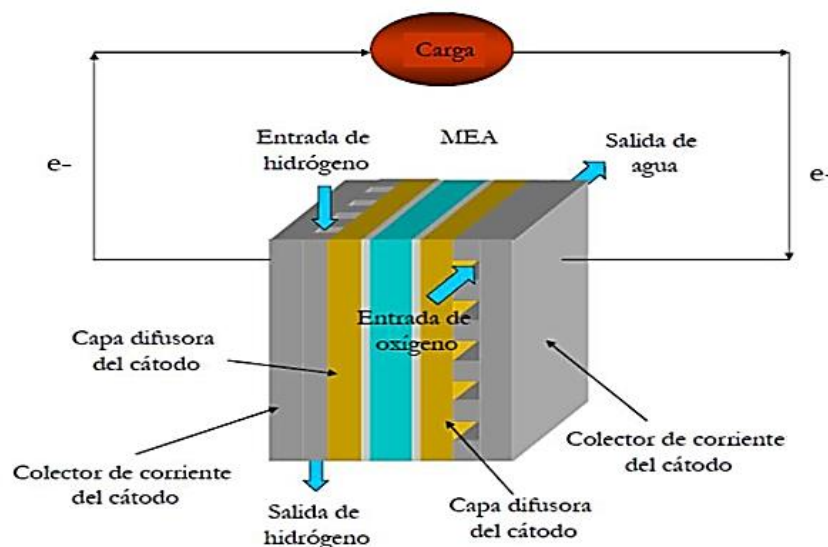
**Fuente:** (Ramos, 2012).

### 2.3.7. Celda de combustible

Las celdas de combustible son artefactos electroquímicos que mediante una reacción química son capaces de transformar el combustible de hidrógeno en energía eléctrica y calorífica. Existe una gran diferencia entre las pilas convencionales que almacenan energía, las mismas que depende de la cantidad de los reactivos que contienen en ellas.

Las celdas de combustible requieren un constante suministro de hidrógeno para generar electricidad de manera incesante, mientras no se agote el combustible verde; la celda está conformada por dos electrodos, donde el combustible se encuentra en el ánodo y el oxidante (oxígeno) en el cátodo, finalmente entre estos electrodos se localiza una membrana que fuerza a los electrones pasar por el ánodo hacia el cátodo de la celda de combustible (Aguirre, 2013, pp. 19-21). En la ilustración 2-9 se muestra un esquema de cómo funciona una celda de combustible, normalmente el hidrógeno suministrado se encuentra en estado líquido.

En el sector automotriz ocupada un papel muy importante, ya que el uso de esta tecnología ofrece una gran eficiencia energética, por esta razón las pilas de combustible permiten que los vehículos puedan recorrer largas distancias con una menor cantidad de combustible usada por un vehículo tradicional con motor de combustión interna. Los vehículos con celdas de combustible son autos totalmente eléctricos y silenciosos; los mismos que ofrecen un par elevado a bajas RPM, un alto rendimiento energético y bajas o nulas emisiones.



**Ilustración 2-9:** Esquema del funcionamiento de una celda de combustible

Fuente: (Aguirre, 2013, p. 26).

### 2.3.7.1. Tipos de celdas de combustible

Según Cando y Quelal (2012, pp. 76-86) los diferentes tipos de celdas de combustibles normalmente se caracterizan por el tipo de material con la que están compuestas. Existen una gran cantidad de pilas de combustible, sin embargo, se presentan seis tipos de celdas de combustible, de acuerdo con previos estudios, estas ofrecen una excelente viabilidad económica, las cuales son:

- Alcalina (AFC)
- Carbonato fundido (MCFC)
- Ácido fosfórico (PAFC)
- Membrana polimérica (PEMFC)
- Óxido sólido (SOFC)
- Conversión directa de metanol (DMFC)

#### 2.3.7.2. *Baterías acumuladoras o recargables*

Un acumulador eléctrico es un dispositivo electroquímico que permite el almacenaje de energía eléctrica por procesos químicos, la cual carga y libera energía durante la descarga por procesos químicos reversibles al conectarse a un circuito de consumo externo, entre las más utilizadas en la automoción son:

- Acumuladores de plomo – ácido
- Baterías de níquel cadmio (Ni/Cd)
- Baterías de níquel – hidruro metálico (Ni/MH)
- Baterías de zinc – aire
- Baterías de litio

#### 2.3.8. *El Hidrógeno como una alternativa para el futuro*

El hidrógeno a través de los años se ha ido consolidando como una alternativa viable y amigable con el medio ambiente, capaz de obtenerse en gran cantidad en la naturaleza por diferentes procesos a diferencia de las fuentes de energía fósiles con cantidades limitadas en la tierra y generadores de la mayor tasa de gases contaminantes. Además, es fundamental explicar el impacto socio ambiental de la implementación del hidrógeno como combustible, el problema principal no es el cambio de la matriz energética, sino las tecnologías e información que permitan una transición continua del cambio energético.

##### 2.3.8.1. *Economía del hidrógeno*

La producción de hidrógeno mediante el proceso de reformación de un gas, este método se asemeja al de las energías no renovables por ello es necesario reducir el elevado porcentaje de contaminantes, que es similar a la producción de gas natural, carbón y combustibles fósiles. Lo mejor es aumentar la producción de hidrógeno con técnicas más limpias para el medio ambiente, por ejemplo, la electrolisis, a pesar de que en un inicio no haya una óptima eficiencia y costes por

dicho proceso. Los métodos más relevantes y potenciales en cuestión de reducción de emisiones para mejorar la producción de hidrógeno son: división del metano, aplicaciones térmicas en electrolisis y sistema de monitorización (SMR) con CCUS (Carbon Capture, Use and Storage, con el propósito de reducir emisiones).

Copa (2020, p. 3) explica que el proceso más económico para obtener hidrógeno es a través de la modificación del gas natural mediante calor, en otras palabras, la reforma de un gas (metano), que al reaccionar con el vapor de agua sobre un catalizador de níquel que se encuentra a altas temperaturas, las cuales son superiores a 1.200 Kelvin y presiones de entre 20 a 30 bares.

En la tabla 2-6 se muestran las principales ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible, dichos puntos dependen de los tipos de producción de hidrógeno, los cuales se clasifican en cuatro, el hidrógeno gris es el que genera un cantidad notable de emisiones de efecto invernadero, el tipo azul es el que genera bajas emisiones que pueden ser reutilizadas y almacenadas, el de tipo marrón que es similar al gris pero es generado mediante el uso de carbón, y finalmente el verde que es conocido como hidrógeno limpio, que es aquel que no genera ningún tipo de emisiones durante su proceso de producción.

**Tabla 2-6:** Ventajas e inconvenientes del hidrógeno

Ventajas	Desventajas
Alta densidad energética	Difícil de almacenar
Cantidad ilimitada	Elevado coste de producción
Fuente de energía renovable y limpia	Alto riesgo de seguridad
Elemento no corrosivo	Complejo proceso de producción
No es tóxico	

Fuente: (Borja et al., 2014, pp. 49-51)

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Algunas ventajas y desventajas del uso de hidrógeno como combustible en el sector automotriz son:

- El hidrógeno es combustible que se extrae del agua.
- Los productos de la combustión son vapor de agua y residuos de algunos óxidos de nitrógeno.
- Un motor de combustión de hidrógeno puede producir 200 veces menos emisiones de óxidos de nitrógeno.
- Las pilas de combustible operan a bajas temperaturas y presiones.
- Se requiere un gasto extra ya que no es combustible primario.
- El sistema de almacenamiento y producción es costoso.
- Al ser una nueva tecnología, posee varios problemas de funcionamiento.

### *2.3.8.2. Masificación de la energía*

Actualmente el uso de hidrocarburos es la fuente principal de energía con una gran generación de gases contaminantes y a su vez es una fuente de energía con cantidades limitadas, por lo cual se vuelve de prioridad encontrar una fuente de energía abundante, de bajo costo de producción y un menor índice de contaminación. El futuro de la implementación del hidrógeno como combustible es poco alentador, debido a que se necesita nuevas alternativas económicas, energéticas y tecnológicas; la causa más significativa es el modelo energético monopolista de los combustibles fósiles a uno con total independencia, es decir, que la población sea capaz de generar la energía que utilizaran, también se lo podría denominar como autosuficientes de manera energética.

Ante esta necesidad, surge la posibilidad de aprovechar el creciente del hidrógeno como combustible que se ha generado a través de los años, debido a que se puede utilizar como combustibles alternativos o adicional, además de la obtención por métodos de bajo impacto ambiental como la electrolisis. Uno de los principales beneficios de este elemento es la baja contaminación ambiental, la cual provee una gran cantidad energética similar o mayor a la comparada con el gas natural o gasolina, pero dependiendo del proceso de producción y aplicación idónea, por ejemplo, en el uso del hidrógeno en las celdas de combustible, es la aplicación con mayor eficiencia en el sector automotriz.



## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

El presente proyecto se basa en una investigación de experimental para recolectar y analizar los datos de dos variables relevantes, tales son la alimentación de un motor cuatro tiempos con exclusivamente gasolina y una mezcla de gasolina con hidrógeno como combustible adicional, con el propósito de examinar la emisión de gases, consumo de combustible y rendimiento del motor en dichas condiciones de trabajo. Por otra parte, es importante recalcar que el estudio se ha realizado combinando diferentes campos de investigación como la química en el proceso de electrolisis de agua para la obtención del hidrógeno, además, interviene los análisis de la composición y volumen de los gases del estudio, parte de la física para calcular la potencia del motor en un dinamómetro vehicular, en la implementación de un ciclo de conducción normalizado para evaluar el consumo de combustible en los diferentes ensayos de funcionamiento, y de forma esencial en la mecánica para los procesos de adaptación del generador de hidrógeno y restauración del vehículo monoplaça.

#### **3.1. Enfoque de la investigación**

El proyecto de investigación sobre la factibilidad de la implementación del uso hidrógeno como combustible suplementario para impulsar un vehículo monoplaça se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, por el hecho de la manipulación de valores numéricos que permiten cuantificar las variables del presente proyecto en las diferentes pruebas de funcionamiento. Esto permite sostener una secuencia lógica para analizar los datos obtenidos de cada ensayo, los cuales constan de examinar el consumo de combustible, rendimiento y emisión de gases de un motor de cuatro tiempos, en donde los parámetros de entrada de las pruebas de funcionamiento son los dos tipos de sistema de alimentación descritos en este estudio, es decir, utilizar exclusivamente gasolina y una mezcla de hidrógeno en estado gaseoso con gasolina. Por lo tanto, el uso de este enfoque es imprescindible para realizar una comparación de los resultados conseguidos de los parámetros de entrada para cada ensayo, los datos para el análisis comparativo se obtienen mediante estudios experimentales que se detallan en los siguientes subtemas de este capítulo.

#### **3.2. Nivel de investigación**

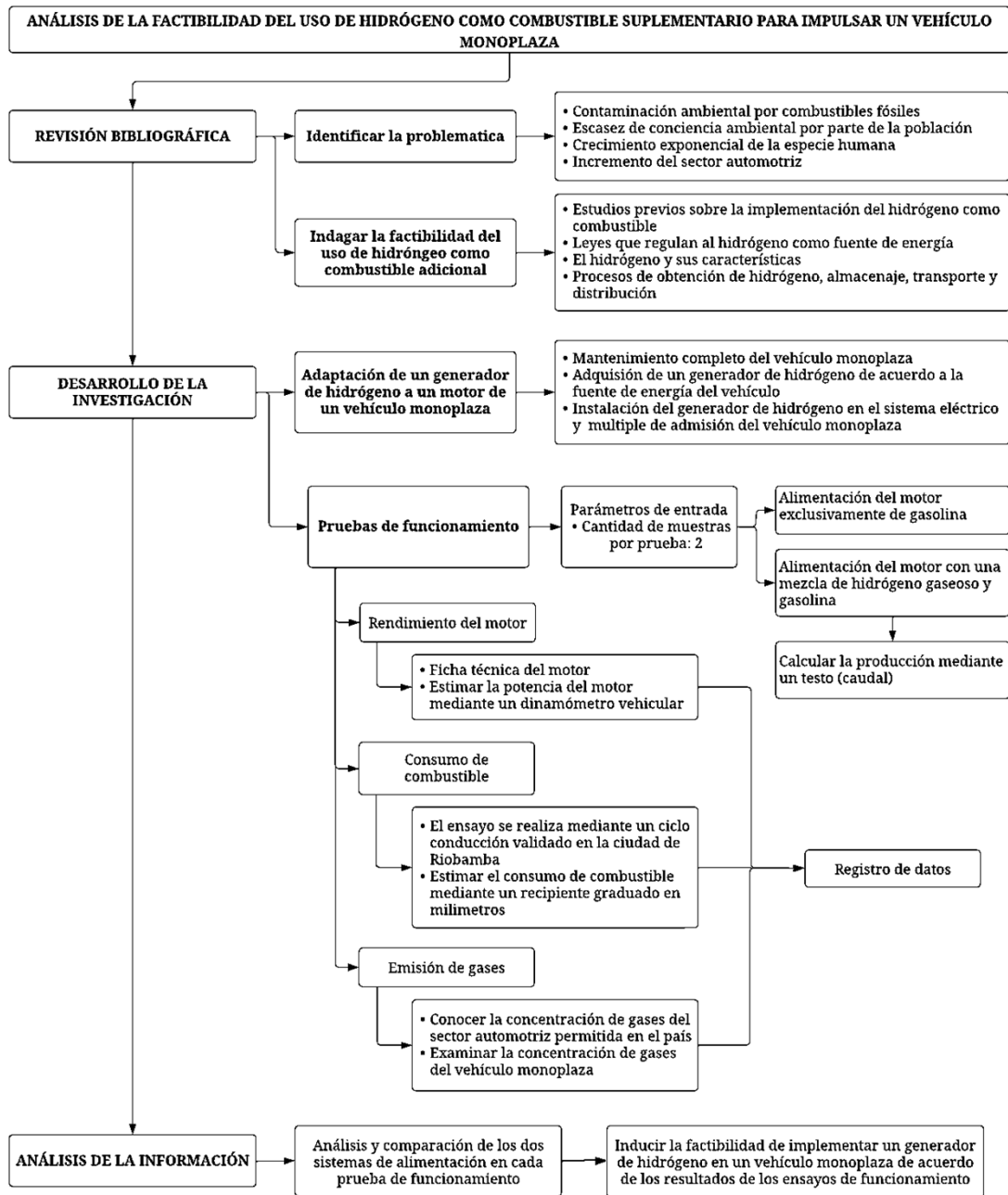
Los niveles de investigación seleccionados para el presente proyecto son el experimental y descriptivo, donde las dos variables primordiales a analizar son la alimentación únicamente de

gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, la manipulación de este grupo de variables se lo denomina un grupo experimental, es decir que son variables independientes. Por otro lado, los resultados de las tres pruebas de funcionamiento que son afectadas por la manipulación de las variables independientes son variables dependientes, las cuales son características notables de una investigación experimental.

En el procedimiento de comparar y describir el comportamiento del motor de un vehículo monoplaza sometido a los diferentes ensayos de funcionamiento, se necesita de un previo diseño de investigación, lo cual se refiere a una investigación de carácter descriptivo, así mismo, su objetivo es recopilar datos e información de forma abundante, por ello es habitual el uso de métodos cuantificables, que tienen relación con el tipo de enfoque del proyecto de investigación, además, como parte del método de observación tanto cuantitativa como cualitativa, que es aquella que mide las características de los elementos a investigar.

### **3.3. Diseño de investigación**

El presente proyecto de investigación se desarrolla de acuerdo con el siguiente esquema de la ilustración 3-1, el cual muestra una síntesis de la metodología usada para llegar a inducir la factibilidad de implementar un generador encargado de suministrar hidrógeno gaseoso como combustible suplementario para un vehículo monoplaza, en el esquema se indica tres puntos importantes, el primero es una revisión bibliográfica de donde se ha identificado la problemática y fundamentos sobre la implementación de hidrógeno como combustible sustituto y/o adicional en vehículos de todo tipo, la segunda parte es el desarrollo de la investigación, el cual señala la campaña experimental con todas sus características para cada prueba de funcionamiento. Finalmente, en el análisis de la información se realiza una comparación de los datos obtenidos de los ensayos de funcionamiento de los dos sistemas de alimentación.



**Ilustración 3-1:** Esquema empleado para el diseño de la investigación

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.3.1. Población y planificación

El sector automotriz en el Ecuador ha incrementado drásticamente durante los últimos años, a pesar de la compleja situación económica que atraviesa el País. Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), con información presentada por el SRI, que indica un notorio incremento de motocicletas siendo el vehículo de transporte con mayor preferencia por

los consumidores, dicho sector es la población que interviene en el presente estudio, a razón de la adaptación de un generador de hidrógeno en este tipo de vehículo monoplaça.

De acuerdo con la inclinación de cada persona por el estilo de motocicleta a adquirir, ya sea versátil, pequeña o económicas, en el Ecuador se comercializa los siguientes tipos: deportivas, cross, tricimotos, turismo, cuadrones, súper deportivas y mini motos. Dependiendo el tipo de motocicleta existen marcas que se encargan de ofrecer el mejor producto hacia sus clientes entre los cuales tenemos: Suzuki, Yamaha, Tundra, Sukida, etc.

A continuación, se evidencia en tabla 3-1 el mercado nacional mensualmente durante los últimos 3 años y el crecimiento que representó año tras año.

**Tabla 3-1:** Comercialización de motocicletas en Ecuador

MES	2019	2020	2021
<b>Enero</b>	11.395	12.445	12.168
<b>Febrero</b>	9.595	9.971	11.195
<b>Marzo</b>	9.878	4.928	12.418
<b>Abril</b>	13.179	1.155	12.784
<b>Mayo</b>	13.482	7.189	14.506
<b>Junio</b>	12.376	14.433	15.736
<b>Julio</b>	13.400	15.687	15.227
<b>Agosto</b>	11.957	13.751	14.951
<b>Septiembre</b>	11.958	13.056	14.189
<b>Octubre</b>	12.557	12.675	13.825
<b>Noviembre</b>	14.955	15.663	17.322
<b>Diciembre</b>	9.995	9.530	10.230
<b>Total</b>	144.727	130.483	164.551

**Fuente:** (AEADE – Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2022)

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

En el 2019 se vendieron 144.727 unidades de motocicletas en el país, siendo febrero, marzo y diciembre los meses con menor demanda comparado a los demás. El año 2020 fue afectado por el coronavirus a nivel mundial ocasionado grandes pérdidas en el mercado automotor sin embargo se registró 130.483 unidades vendidas en ese año aproximadamente un 10% menos con respecto al 2019, siendo febrero, marzo, abril y mayo los meses con menor demanda debido al COVID. Por último, en el año 2021 el número total de motos vendidas subió a 164.551 unidades siendo el mes de noviembre como el más productivo, y el año que se evidenció un gran crecimiento en comparación a los años posteriores.

El presente proyecto de investigación está centrado a los vehículos monoplazas siendo empleados para uso personal o laboral, dependiendo la marca estos constan con modificaciones de fábrica como el tipo de inyección o frenos, sin embargo, el funcionamiento del motor no varía, considerando un motor de 4 tiempos: admisión, compresión, explosión y escape. A través de una revisión de características y especificaciones técnicas sobre el vehículo monoplaza a emplear en conjunto con el dispositivo generador de hidrógeno, el estudio se llevó a cabo en la Ciudad de Riobamba, a lo que relaciona con respecto al desarrollo de las pruebas de funcionamiento de: emisión de gases y consumo de combustible, sin embargo, por falta de instrumentos en la localización, las pruebas de potencia se realizaron en la ciudad de Ambato.

### **3.4. Tipo de estudio**

#### **3.4.1. *Revisión bibliográfica***

El método científico ha sido usado en este apartado para recolectar información tanto teórica como empírica, ya que para el desarrollo de la investigación es necesario una justificación del conocimiento, es decir, que el conocimiento sea verdadero. Por lo tanto, el método científico es un conjunto de pasos a seguir para generar un conocimiento objetivo, regulado por reglas estrictas que no pongan en duda el estudio realizado, además, se entiende que, a partir de los métodos, instrumentos y técnicas, se examina y soluciona una problemática, la cual es la contaminación por la ignición de combustibles fósiles del parque automotor.

Para que el conocimiento sea de carácter científico debe cumplir con al menos tres requisitos, el primero se refiere a que la información debe ser objetiva, es decir, que los estudios sean válidos para todos y que no entre en un ámbito personal, del mismo modo que en el procedimiento para recopilar información sobre implementaciones previas del hidrógeno como combustible alternativo o suplementario, también justifica que el uso de aquel elemento como una fuente de energía, sea capaz de reducir la contaminación por quema de combustibles fósiles. El segundo requisito es la abstracción de la información, dicho de otro modo, el conocimiento siempre será el mismo independiente del tiempo y espacio. La relevancia empírica es el último requisito, el más importante para justificar los hechos de un estudio, de ahí que la experimentación es usada para poner a prueba la hipótesis de un fenómeno u objeto de estudio. La información fue recolectada mediante buscadores académicos, por ejemplo: Google académico, Latindex, Scielo, Scopus, entre otros.

### **3.4.2. Desarrollo de la investigación**

La investigación experimental es uno de los métodos principales de la investigación cuantitativa, para que este tipo de estudio sea considerado exitoso, las variables dependientes (valores de rendimiento, consumo de combustible y emisión de gases) deben mostrar algún cambio cuando se manipulan las variables independientes (sistemas de alimentación), es decir, al establecer las causas de un fenómeno se debe tener los efectos de estas. Las pruebas de funcionamiento para examinar el comportamiento del motor de un vehículo monoplaza, es una investigación de tipo experimental, ya que se realiza bajo condiciones científicamente admisibles, permitiendo al investigador realizar dicho evento cuando lo desee para una observación precisa de las variaciones de los resultados. Por ende, este tipo de estudio entra en la categoría de experimento confirmatorio, debido a que desea comprobar la hipótesis del proyecto de investigación.

### **3.4.3. Análisis de la información**

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se emplearon recursos y métodos, los cuales favorecieron a obtener la información necesaria para realizar el estudio “Análisis de la factibilidad del uso de hidrógeno como combustible suplementario para impulsar un vehículo monoplaza”, además de aplicar de forma continua los conocimientos adquiridos durante la formación académica y aprovechar las técnicas de investigación científica. Los métodos usados se describen a continuación:

#### **3.4.3.1. Método descriptivo**

El método descriptivo permite organizar, analizar y resumir la información acerca del generador de hidrógeno y vehículo monoplaza empleado en la campaña de experimentación para obtener resultados adecuados. Además, este método implica la recopilación de datos para tener una idea clara de una determinada situación al momento de realizar las pruebas de funcionamiento como el consumo de combustible, emisión de gases y rendimiento del motor.

#### **3.4.3.2. Método analítico**

A medida que avanza el trabajo de investigación, no solo en aspectos teóricos y científicos, se emplea el método analítico para establecer criterios de aceptación a partir de datos obtenidos de las pruebas de funcionamiento del consumo de combustible, emisión de gases y rendimiento del

motor, cada uno estudiado de manera individual mejorando su valoración, además de evidenciar los resultados obtenidos corroborando la fiabilidad de la investigación.

#### *3.4.3.3. Método transversal*

Este tipo de método ayuda a analizar las distintas pruebas de funcionamiento realizadas en el estudio sobre una determinada población, en este caso a vehículos monoplasas durante un tiempo determinado, el cual se estableció en el periodo académico Octubre - Febrero y llegar a obtener conclusiones sobre su comportamiento, en otras palabras, la investigación transversal permite comparar una gran cantidad de variables al mismo tiempo sobre una determinada población, cabe recalcar que las variables de entrada permanecen constantes en todo el estudio.

#### *3.4.3.4. Método inductivo*

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de consumo de combustible, emisión de gases y rendimiento del motor, el método inductivo permite explicar los datos obtenidos de cada experimento realizado para concluir mediante el razonamiento y conocimientos la veracidad del estudio, que parte de un caso particular de estudio para desarrollar conclusiones generales de la población involucrada en el presente proyecto.

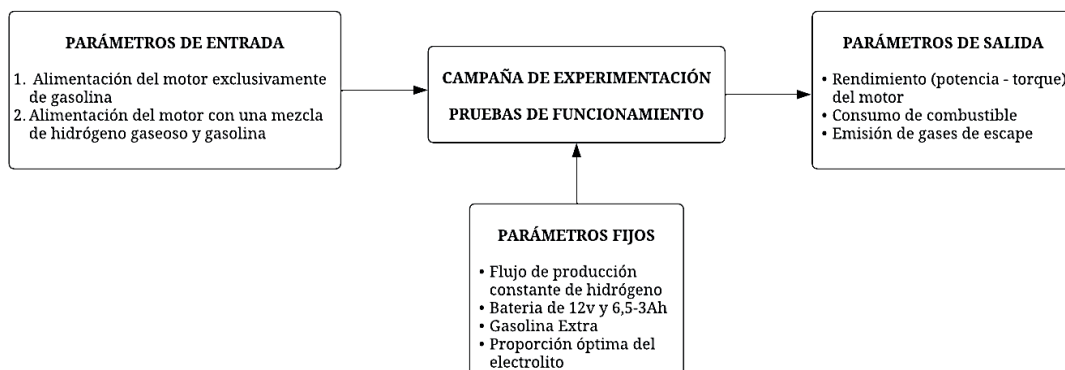
### **3.5. Métodos, técnicas e instrumentos**

La metodología principal aplicada en el desarrollo del trabajo de investigación fue la experimental, en este apartado se explicó los métodos, técnicas e instrumentos que fueron utilizados para realizar la campaña experimental, es decir, que se realizó una explicación detallada de cada uno de los objetivos específicos del presente proyecto de investigación, además, se necesita de información teórica y técnica que permite organizar un contexto determinado para reducir la incertidumbre o ampliar el conocimiento acerca de una situación. Dicha información es recolectada mediante una agrupación de proyectos de investigación, artículos científicos, tesis y fichas técnicas, cada uno extraído de fuentes confiables pertenecientes a una comunidad educativa profesional con el fin de llevar a cabo una investigación clara y precisa, obteniendo resultados idóneos, además de cumplir los objetivos deseados del estudio y proporcionando conclusiones coherentes.

Para las pruebas de funcionamiento se procede a enumerar condiciones necesarias para obtener resultados reales, evitando variaciones notables en su proceso, entonces se plantean las siguientes consideraciones:

- Mantenimiento total de vehículo, en el anexo A y B se detalla una lista del mantenimiento realizado y parte del proceso de este.
- Condiciones normales de funcionamiento.
- No se toman en cuenta las pérdidas de transmisión entre el motor y la rueda.
- Las pérdidas de calor debido a la zona (Riobamba) no son tomadas en cuenta.
- La altura de la ciudad de Riobamba de aproximadamente 2.750 metros sobre el nivel del mar.
- El uso de gasolina Extra.
- Una batería con un voltaje de 12v y capacidad de entre 6,5 a 3 AH (amperios hora).
- Electrolito en una proporción recomendado de agua y bicarbonato de sodio.

Con aquellas consideraciones para realizar la campaña de experimentación del presente estudio, los cuales son tomados en cuenta en el esquema de la ilustración 3-2, donde se detalla los parámetros de entrada, salida y fijos empleados en las tres pruebas de funcionamiento. Los parámetros de entrada permiten evaluar el objeto de estudio en las dos condiciones de funcionamiento, referentes al tipo de sistema de alimentación del vehículo monoplaça, cada parámetro de entrada influirá de forma independiente a los parámetros de salida, es decir, la evaluación consta de forma independiente para los dos tipos de sistemas de alimentación.



**Ilustración 3-2:** Esquema representativo para realizar las pruebas de funcionamiento

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

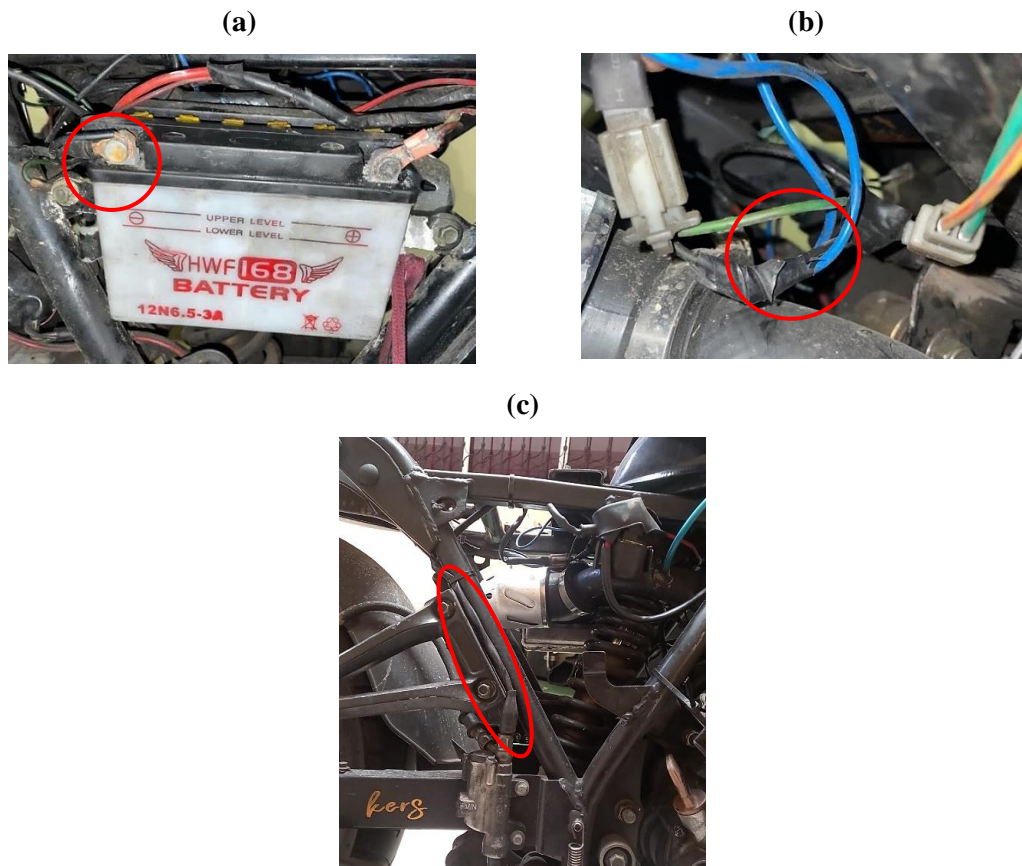
### 3.5.1. Adaptación del generador de hidrógeno al vehículo monoplaça

#### 3.5.1.1. Conexiones eléctricas

La primera parte de esta adaptación es realizar la instalación del generador de hidrógeno al sistema eléctrico del vehículo, lo cual con un cable de color negro se realiza una conexión directa del borne negativo de la batería, para el polo positivo (cable celeste) se analiza un parte del sistema eléctrico que sea accionado cuando el switch del vehículo se encuentre en ON, a razón de



suministrar hidrógeno solo cuando el vehículo entre en funcionamiento evitando desperdiciar el gas, dicha conexión se la realizo mediante un empalme del cable positivo de un accionador, el cual activa el halógeno o faro del freno de la llanta posterior del vehículo. La alimentación del generador de hidrógeno es de 12 voltios que provienen de la batería, no obstante, cuando el vehículo entra en funcionamiento el voltaje incrementa aproximadamente entre 13 y 14 voltios debido al dinamo de la motocicleta, en la ilustración 3-3 se muestra las conexiones del sistema eléctrico.



**Ilustración 3-3:** (a) Conexión del polo negativo, (b) Conexión del polo positivo, (c) Cableado del accionador del halógeno del freno de la llanta posterior

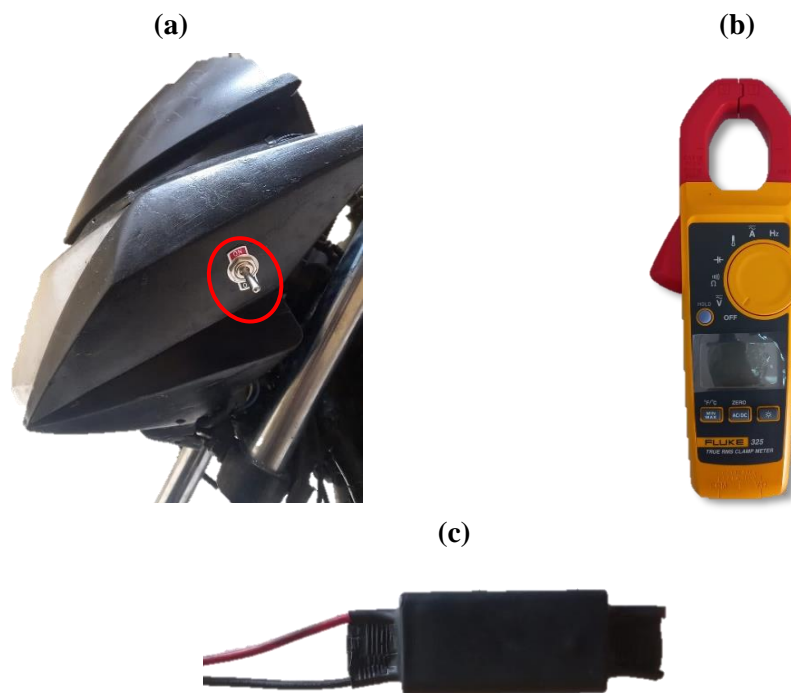
**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Para activar y desactivar el generador de hidrógeno se añade un interruptor en el cable negativo (negro) para abrir el circuito en caso de que el usuario no desee una alimentación por una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, el interruptor está ubicado en la parte izquierda de la mascarilla delantera del vehículo como se muestra en la ilustración 3-4 literal a, debido al espacio disponible en esta área.

El interruptor tiene una capacidad alta de amperaje para evitar que este se queme debido al alto amperaje de consumo del generador cuando el vehículo se encuentra en funcionamiento, dicho

consumo tiene un promedio de 3,64 amperios como se detalla en anexo C, se calculó el amperaje con una pinza amperimétrica fluke 325 como se muestra en la ilustración 3-4 literal b, para lo cual se debe atravesar el cable positivo del generador a través de la pinza, el interruptor es capaz de soportar entre 15 a 20 amperios y 125 volteos tanto de corriente directa como alterna.

El sistema tenía un regulador de voltaje que suministraba al generador aproximadamente en 1 voltaje como se muestra en la ilustración 3-4 literal c, y en el anexo D se muestra voltaje de que suministra el regulador a través de un multímetro, el mismo que fue removido ya que la producción de hidrógeno era muy baja, casi nula porque el instrumento que se usó para medir la velocidad del fluido no era capaz de detectar dicho flujo.



**Ilustración 3-4:** (a) Interruptor del generador de hidrógeno, (b) Pinza amperimétrica Fluke 325, (c) Regulador de voltaje de 12 voltios a 1 voltio

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.1.2. Conexión al múltiple de admisión

Luego de realizar la instalación eléctrica, se procede a realizar una perforación de  $\frac{1}{4}$  de pulgada en el tubo del múltiple de admisión para insertar la manguera por donde fluye el hidrógeno gaseoso, entonces para evitar fugas de dicho gas se sella los bordes de manguera mediante soldadura fría de la marca ABRO como se muestra en la ilustración 3-5, aquel tipo de soldadura

es un pegamento epóxico usado en reparaciones industriales debido a su alta resistencia a la temperatura, tensión, dureza y ataques químicos.



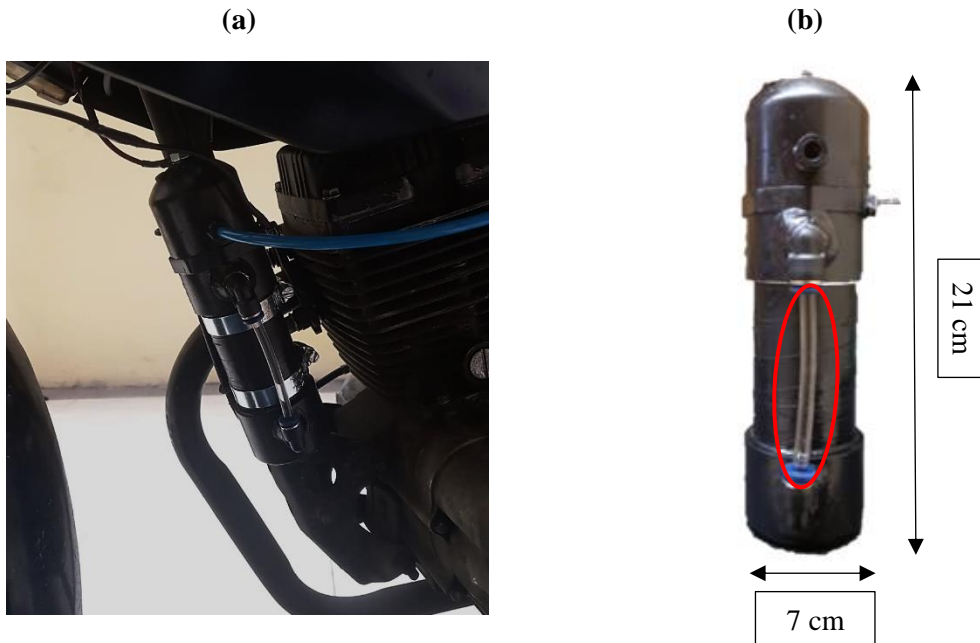
**Ilustración 3-5:** Instalación de la conexión del generador de hidrógeno en el múltiple de admisión

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.1.3. Ubicación y electrolito del generador de hidrógeno

El generador de hidrógeno es ajustado en el chasis de la motocicleta en la parte frontal de los anclajes del motor, se utilizan dos abrazaderas metálicas de un tamaño ajustable de dos a tres pulgadas como se evidencia en la ilustración 3-6 literal a. El generador de hidrógeno ocupa un espacio de aproximadamente 21 centímetros de longitud, 7 centímetros de ancho y 9 centímetros de profundidad como se muestra en la ilustración 3-6 literal b, aquellas mediciones se realizan mediante un flexómetro.

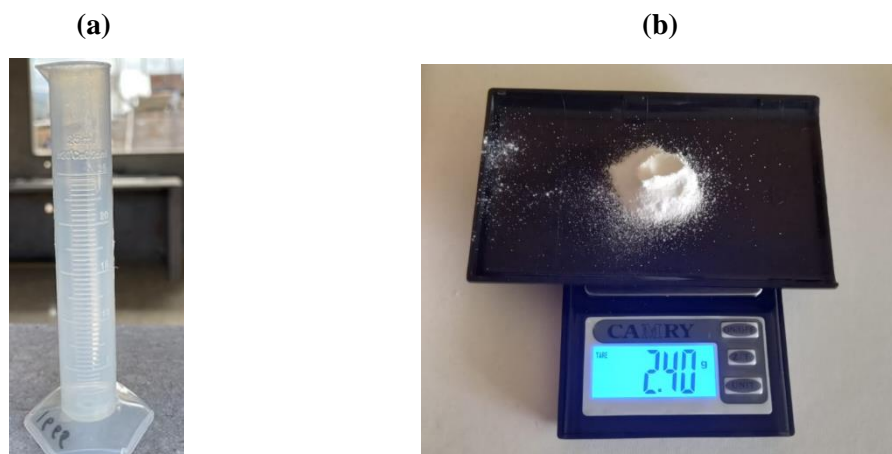
Se debe suministrar un óptimo electrolito, que es una mezcla de agua y bicarbonato de sodio, el generador de hidrógeno tiene una capacidad recomendada de 120 mililitros, cuya capacidad fue calculada mediante una probeta graduada (en la ilustración 3-7 literal a se muestra la herramienta utilizada), es decir, que debe de cubrir todo el medidor del generador, que es una manguera transparente de 3/16 de pulgada como se muestra en la ilustración 3-6 literal b enmarcado en un ovalo rojo.



**Ilustración 3-6:** (a) Ubicación del generador de hidrógeno, (b) Tamaño del generador de hidrógeno

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

El electrolito cuenta con 2,40 gramos de bicarbonato de sodio como se evidencia en la ilustración 3-7 literal b, se utiliza dicho elemento porque es una fuente conductora de carga, es decir, que las sales del bicarbonato se hidrolizan (que rompe la estructura molecular del agua) formando electrólitos (capacidad para transmitir una corriente eléctrica). Se obtiene aquella proporción debido a la recomendación de la empresa que ofrece el generador de hidrógeno al mercado, la cual son 10 gramos de bicarbonato de sodio (lo que aproximadamente cabe en una cuchara) disueltos en medio litro de agua, mediante una regla de tres se obtiene 2,40 gramos de bicarbonato por 120 mililitros de agua, el cual es el contenido máximo del generador de hidrógeno.



**Ilustración 3-7:** (a) Probeta graduada de 25 mililitros, (b) Balanza digital

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.1.4. Flujo másico de producción de hidrógeno

Para calcular el flujo másico de producción del generador de hidrógeno es necesario conocer la velocidad del gas y área por donde fluye el hidrógeno hacia el múltiple de admisión. El instrumento usado para medir la velocidad de producción de hidrógeno es el testo 340 como se muestra en la ilustración 3-8, el cual es una herramienta de medición portátil para el análisis profesional de gases producto de la combustión en los siguientes campos de estudio: sistemas de procesos en plantas de combustión industriales, fabricantes y operarios de motores, procesos de servicio y calderas en el sector industrial. Además, el testo 340 incluye algunas tareas adicionales de medición, así como la proporción de dilución de CO/NO, presiones de gases y emisiones, esta última tarea fue seleccionado ya que permite mesurar la velocidad del flujo en unidades de pies por minuto.



**Ilustración 3-8:** Analizador de gases, testo 340

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Para medir correctamente la velocidad se debe tener en cuenta los parámetros de la forma y superficie del área del tubo de salida, asimismo el factor Pitot y deriva, el factor Pitot depende de su tipo, el cual se clasifica en dos: tubo Pitot recto (factor Pitot: 0,67) y Prandtl (curvado – factor Pitot: 1,00), este último tipo es que se utiliza para las mediciones del proyecto como se muestra en la ilustración 3-9. Por otra parte, el factor deriva se refiere a las áreas determinadas y parte del área libre por la que fluye dicho fluido, por ejemplo 30% del área está cubierta y un 70% se encuentre libre, de manera que el factor deriva es el 0,70; no obstante, normalmente el factor de corrección se establece 1,00 para todas las aplicaciones estándares (Testo SE y Co. KGaA 2010, p. 23).



**Ilustración 3-9:** Tubo Pitot Prandtl o curvado

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.



Para medir el flujo másico de producción de hidrógeno, se lo realiza con el testo 340, se deben tomar algunas consideraciones expuestas anteriormente, en donde se considera parámetros de forma, área, factor Pitot y factor deriva. Primero se mide la velocidad del fluido, donde se debe conectar el tubo Pitot curvado (longitud del tubo: 55 centímetros y ancho del tubo: 5 centímetros) mediante una manguera de ¼ de pulgada (6,3 milímetros) a la entrada de presión positiva del instrumento como se muestra en la ilustración 3-10, luego en “Mediciones” dentro de las opciones principales del equipo, la séptima opción de “ft/min” nos permite medir la velocidad del flujo, tal cual en las unidades de dicha opción que son pies por minuto, el proceso se muestra en la ilustración 3-11.



**Ilustración 3-10:** Entrada de presión positiva

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.



**Ilustración 3-11:** (a) Opción del menú principal “Mediciones”, (b) Opción del menú de mediciones “ft/min”

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Posteriormente se realiza diez mediciones para obtener un promedio de la velocidad del fluido, para lo cual se acerca el tubo Pitot a la salida de la manguera de generador de hidrógeno. Cabe

recalcar que las mediciones se realizaron cuando el vehículo se encontraba en funcionamiento. En la ilustración 3-12 se muestra una de las 10 pruebas realizadas para calcular la velocidad del flujo de producción de hidrógeno. Además, se mide la presión del flujo de producción en milibares (mbar), este parámetro se utilizará posteriormente para calcular la densidad del gas.



**Ilustración 3-12:** Proceso de medición de velocidad

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Mediante el uso del equipo testo 340, se puede medir la temperatura del fluido y el porcentaje de oxígeno que contiene la mezcla de producción del generador de hidrógeno, dicha mezcla abarca en su mayor parte hidrógeno que oxígeno. Para medir ambos parámetros se ingresa en la primera opción de las mediciones del testo “Flue gas + ft/min” como se muestra en la ilustración 3-13 literal a.

Luego mediante la sonda que posee este tipo de instrumento se mide la temperatura y porcentaje de oxígeno del generador de hidrógeno, dicha sonda es colocada en la salida del generador; el porcentaje de oxígeno se mantiene constante, aproximadamente un valor de 20,80%, aquel porcentaje es el que se utiliza para los cálculos posteriores, con respecto a la temperatura se realiza un promedio de 10 mediciones debido a su leve variabilidad, en la ilustración 3-13 literal b se muestran los valores de la opción del menú de mediciones “Flue gas + ft/min”.



**Ilustración 3-13:** (a) Opción del menú de mediciones “Flue gas + ft/min”, (b) Proceso de medición de la temperatura y porcentaje de oxígeno

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

El área por donde fluye el gas es el siguiente parámetro indispensable para conocer la cantidad de flujo que se suministra al motor por el múltiple de admisión, el instrumento empleado es un calibrador o pie de rey, una herramienta muy utilizada para medir longitudes, espesores, profundidades, diámetros externos e internos, dado que es una regla graduada con una barra fija sobre la cual desliza una mordaza móvil con un cursor para estimar el diámetro del tubo de salida del generador de hidrógeno. El tipo de pie de rey usado fue el calibrador universal estándar como se muestra en la ilustración 3-14 (Gallegos, 2012, pp. 3-4).



**Ilustración 3-14:** Calibrador o pie de rey

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Para hallar el área de la manguera se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (7)$$

Donde:

- A: área de la manguera ( $m^2$ )



- D: diámetro de la manguera ( $m$ )

De acuerdo con la ley de gases ideales, se despeja el parámetro de la densidad, dicho proceso se muestra a continuación:

$$P * V = n * R * T$$

$$P * V = \frac{m}{M} * R * T$$

$$P * M = \frac{m}{V} * R * T$$

$$\frac{P * M}{R * T} = \frac{m}{V}$$

$$d = \frac{P * M}{R * T}$$

(8)

Donde:

- d: densidad de un gas (g/l o  $kg/m^3$ )
- P: presión (atm)
- M: masa molar (g/mol)
- R: constante de los gases ( $0,0821 \frac{atm * l}{K * mol}$ )
- T: temperatura (K)

Finalmente, con los parámetros de la velocidad del fluido, área de tubo y densidad del gas, se utiliza la siguiente fórmula para calcular el flujo másico de producción del generador de hidrógeno:

$$m_f = d * A * v$$

(9)

Donde:

- $m_f$ : flujo masico (kg/s)
- d: densidad de un gas ( $kg/m^3$ )
- A: área del tubo de salida del fluido ( $m^2$ )
- v: velocidad del fluido ( $m/s$ )

### 3.5.1.5. Escala de Beaufort

La escala Beaufort permite medir la intensidad del viento, la cual toma como base la fuerza del viento, estado del mar, forma y altura de las olas. La escala de la tabla 3-2 es utilizada para comparar si la velocidad de producción del generador de hidrógeno es la adecuada, además, se pueden clasificar de acuerdo con los distintos rangos de velocidad descritos en dicha tabla.

**Tabla 3-2:** Escala de Beaufort para clasificar la fuerza del viento

Escala de Beaufort	Nombre de Viento	Velocidad	
		m/s	km/h
0	Calma	0,5	2
1	Aire ligero	1,5	5
2	Brisa ligera	3	11
3	Brisa suave	6	22
4	Brisa moderada	8	30
5	Brisa fresca	11	40
6	Brisa fuerte	14	50
7	Viento moderado	17	60
8	Viento fresco	21	75
9	Viento fuerte	24	87
10	Gran viento	28	100
11	Tempestad	32	115
12	Huracán	36 o más	130 o más

Fuente: (S&P, 2020).

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.2. Prueba de funcionamiento para valorar el rendimiento del motor

#### 3.5.2.1. Anclaje del vehículo

Para evaluar el rendimiento del motor de una motocicleta en un banco de pruebas mixto, se debe ajustar el vehículo con cuerdas de carga de 2,5 centímetros de ancho y de aproximadamente 2 metros de longitud como se muestra en la ilustración 3-15, se debe ajustar firmemente para evitar que el vehículo se desplace mientras se realizan los ensayos, ya que en las pruebas de funcionamiento se exige al máximo el motor para obtener las curvas de potencia y torque, además, es una de las medidas de seguridad que se tiene que tomar en cuenta al momento de realizar los ensayos en el dinamómetro de rodillos.



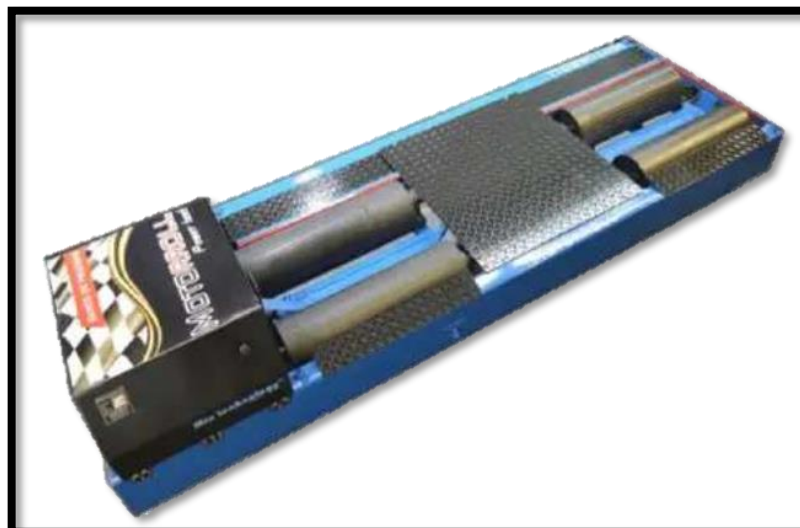
**Ilustración 3-15:** Cuerda de carga

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.2.2. Banco de pruebas de rodillos

En la prueba de funcionamiento del rendimiento del motor se evalúa el vehículo de forma independiente por los parámetros de entrada, lo cuales son los dos tipos de sistema de alimentación como se explica en el esquema de la ilustración 3-1, de manera que se emplea un banco de rodillos mixto de la marca Motorroll modelo Dino 970 IH, por el hecho de permitir las simulaciones de las condiciones de tracción real para medir la potencia y torque del motor. El banco de pruebas mixto posee un software que realiza la suma inercial sumada la dinamométrica en tiempo real, es decir que combina el freno dinamométrico y volante de inercia para poder incorporar a tiempo real y sincrónico las mediciones mediante resultados repetibles de los ensayos para realizar un promedio de este.

El modelo del banco de pruebas de rodillos usado fue un Dino 970 IH del año 2020 como se muestra en la ilustración 3-16, entre las características de este equipo se encuentran: 970 caballos de fuerza (HP) de absorción regulable, su aplicación varía desde motocicletas hasta camiones ligeros y 270 kilómetros por hora (km/h) de velocidad máxima, en conjunto a la electrónica encargada de regular el instrumento, lo cual permite registrar el número de revoluciones del motor, potencia y torque, es decir, se realiza una prueba del rendimiento del motor, dicho ensayo es necesario para realizar una comparación del par y potencia del vehículo sometido a los dos tipos de sistemas de alimentación. En el anexo E se muestra con mayor detalle el banco de rodillo mixtos de la marca Motorroll.



**Ilustración 3-16:** Banco de rodillos mixtos de la marca Motorroll

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.3.3. Conexión del banco de pruebas a la computadora

Además, para poder conectar el banco de pruebas de rodillos con la computadora y visualizar el comportamiento del motor a través de curvas de potencia y torque se necesita de un amplificador de celdas como se muestra en la ilustración 3-17, que interpreta el movimiento de los rodillos en combinación de un freno y volante de inercia en tiempo real, dichos datos son descifrados por el amplificador de celdas que posteriormente son enviados y visualizados al instante en la computadora a la que está conectada el equipo.



**Ilustración 3-17:** Amplificador de celdas del dinamómetro de rodillos

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.3.4. Programa del banco de pruebas y curvas de resultados

Los gráficos de las curvas de potencia y torque son simultaneas sin ningún tipo de retraso mientras el vehículo acelera para posteriormente realizar un análisis gráfico comparativo de ambos sistemas de alimentación, dicho de otro modo, permite examinar el torque y potencia máximo tanto en cigüeñal como en las ruedas midiendo la aceleración real, además, estima la distancia y esfuerzos reales del ensayo en metros o RPM (revoluciones por minuto) del motor (Motorroll, 2021, p. 2).

En otras investigaciones este tipo de banco de pruebas se lo conoce como un dinamómetro de chasis que permite medir la potencia y torque del motor en las ruedas motrices del vehículo, se debe considerar los siguientes términos o características para comprender las curvas del resultado de dicho ensayo (Rosas y Barona, 2011, pp. 5-6):

- Potencia efectiva: es el producto del par motor y velocidad de rotación, también se la conoce como potencia al freno, ya que se utiliza un freno de corrientes parasitas, la cual se opone a la fuerza del motor para medir dicho valor.
- Potencia indicada: es la potencia que se desarrolla en el interior del cilindro de combustión.
- Potencia normalizada: la potencia normalizada indicada se reduce debido a la altitud de la zona, a razón que la presión del cilindro es menor en comparación a la presión a nivel del mar, 1 atmosfera de presión y 17 grados Celsius son las mejores condiciones ambientales.
- Torque: es la fuerza de explosión que se produce en la biela y transmisión, dicha fuerza gira el cigüeñal con un esfuerzo de rotación determinado, en otras palabras, el torque es la división entre la potencia normalizada y la velocidad angular.
- Potencia a la rueda: es aquella potencia que se entrega a los neumáticos, se efectúa desde el interior del cilindro y se transfiere por la caja de cambios hasta las ruedas.
- Potencia de arrastre: es la potencia de la rueda, pero con pérdidas debido a la fricción, vencimiento de la inercia, entre otras causas.

Las características del ensayo de funcionamiento como potencia y torque del vehículo muestran la energía que es capaz de desarrollar por parte del motor, las propiedades se representan mediante gráficas que indican el resultado de las pruebas efectuadas. De acuerdo con la opinión de un experto en el campo, se realizan dos pruebas de funcionamiento por cada condición de estudio, de las cuales se escoge la máxima de aquellas dos pruebas debido a que el motor incrementa su potencia cuando alcanza una temperatura optima de funcionamiento, la cual es sobre los 75 grados Celsius.

#### *3.5.3.5. Proceso de evaluación del rendimiento del motor*

Luego de sujetar la motocicleta al banco de pruebas, se debe seguir las instrucciones de funcionamiento para el ensayo, donde se indica que el vehículo debe ser acelerado paulatinamente hasta llegar a la tercera marcha para posteriormente acelerar al máximo, se recomienda hasta dicha marcha debido a la relación de transmisión 1:1.

Además, se debe verificar las revoluciones y potencia máxima a las que se debe someter el vehículo, según el fabricante en la ficha técnica de la tabla 3-3, detalla la potencia máxima del vehículo, dicho valor es 12 caballos de fuerza (HP) a 7.000 revoluciones por minuto a una velocidad máxima de 90 kilómetros por hora.

**Tabla 3-3:** Ficha técnica de la motocicleta

<b>Modelo</b>	Bronco 150 DX
<b>Categoría</b>	Sporty
<b>Códigos</b>	TD150-AAVL-C TD150-AAQL-C TD150-AAEL-C
<b>Nombre del producto</b>	Moto Tundra Bronco DX 150 CC
<b>Motor</b>	4 tiempos
<b>Tipo de motor</b>	Palillo (OHV)
<b>Enfriamiento</b>	Por aire
<b>Cilindrada</b>	150 cc
<b>N.º de cilindros</b>	1
<b>Potencia</b>	12 HP / 7.000 RPM
<b>Máxima velocidad</b>	90 km/h
<b>Sistema de transmisión</b>	Mecánica – 5 velocidades
<b>Embrague</b>	Húmedo, discos múltiples
<b>Batería</b>	12V – (3-5,5A)
<b>Peso Moto (kilogramos)</b>	115kg
<b>Carga máxima (kilogramos)</b>	150kg
<b>Capacidad del tanque (litros)</b>	13,5l
<b>Rendimiento</b>	150 km x galón
<b>Aceite</b>	20W50

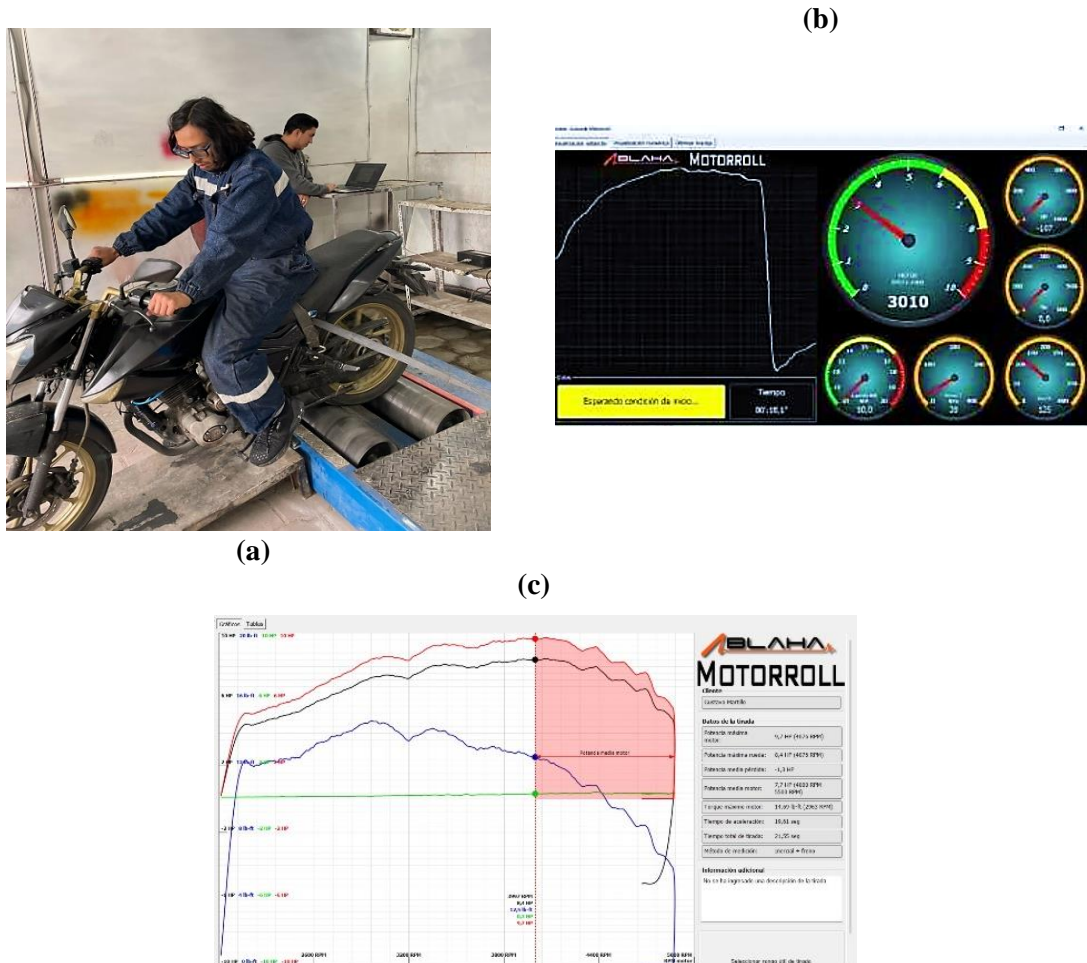
Fuente: (TOTAL HOME, 2021)

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Mediante el software de Motorroll se obtienen las curvas de potencia y par del motor, considerando el aumento progresivo de las revoluciones por minuto sin excederse de la capacidad de 7.000 RPM, los resultados obtenidos del ensayo se los puedo observar mediante curvas y valores numéricos que serán utilizados para su respectivos análisis y comparación de los parámetros de entradas independientes, es decir, los dos tipos de sistemas de alimentación ( uso de exclusivamente gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina).

En la ilustración 3-18 literal a se muestra el proceso del ensayo de funcionamiento mientras el software de Motorroll evalúa la potencia del motor en el literal b, para posteriormente obtener las curvas de la prueba de potencia y torque del motor en el literal c. Para concluir el ensayo no se

debe frenar el vehículo, sino que se tiene que poner la motocicleta en neutro y esperar que desacelere en conjunto a los rodillos del dinamómetro de forma natural sin ninguna intervención.



**Ilustración 3-18:** (a) Prueba de funcionamiento en el dinamómetro, (b) Datos reales del ensayo en el software de Motorroll, (c) Software donde se visualizan las curvas de la prueba de potencia del motor

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.3.6. Validación del dinamómetro de rodillos

El rendimiento del motor se evaluó mediante un banco de rodillos mixto de la marca Motorroll Power Test empresa dedicada al diseño y construcción de maquinaria que permite generar curvas de potencia-torque certificados y calibrados bajo normas nacionales e internacionales, usado por la Empresa automotriz Procar bajo el personal capacitado, siendo autorizados para prestar un servicio acorde a las necesidades del cliente en la Av. Atahualpa y Pasaje Moscoso en la ciudad de Ambato.



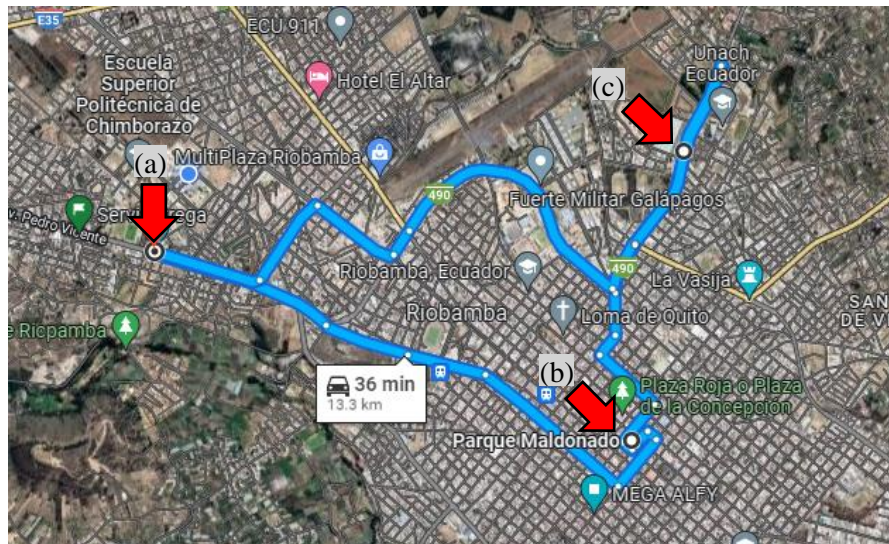
### 3.5.4. Prueba de funcionamiento para evaluar el consumo de combustible

Las pruebas de consumo de combustible tienen la finalidad de comparar los datos obtenidos de un registro de consumo de manera independiente por los parámetros de entrada, aquellos son los dos tipos de sistemas de alimentación, el ensayo se basa en ejecutar un ciclo de conducción realizado por Calva y Flores (2020, pp. 24-25) en la ciudad de Riobamba mediante un reservorio de combustible con una escala graduada en mililitros.

#### 3.5.4.1. Ciclo de conducción

El ciclo de conducción de un vehículo es una serie de puntos que se agrupan para representar la velocidad de dicho vehículo en un tiempo determinado, el cual refleja las condiciones de conducción real como las circunstancias de tráfico, proporcionando una valoración económica debido al consumo de combustible, además, registra las emisiones de gases de escape. Para este ensayo se tomó en cuenta tres puntos principales que son descritos y seleccionados en el trabajo de investigación de Calva y Flores (2020, pp. 24-25), los cuales son:

- Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (a)
- Parque Maldonado (b)
- Paseo Shopping (c)



**Ilustración 3-19:** Ciclo de conducción trazado por los tres puntos principales

Fuente: (Google Maps, 2022)

Por cada parámetro de entrada se realiza el ciclo de conducción que es determinado por los tres puntos principales como se muestra en la ilustración 3-19, en conjunto al reservorio de



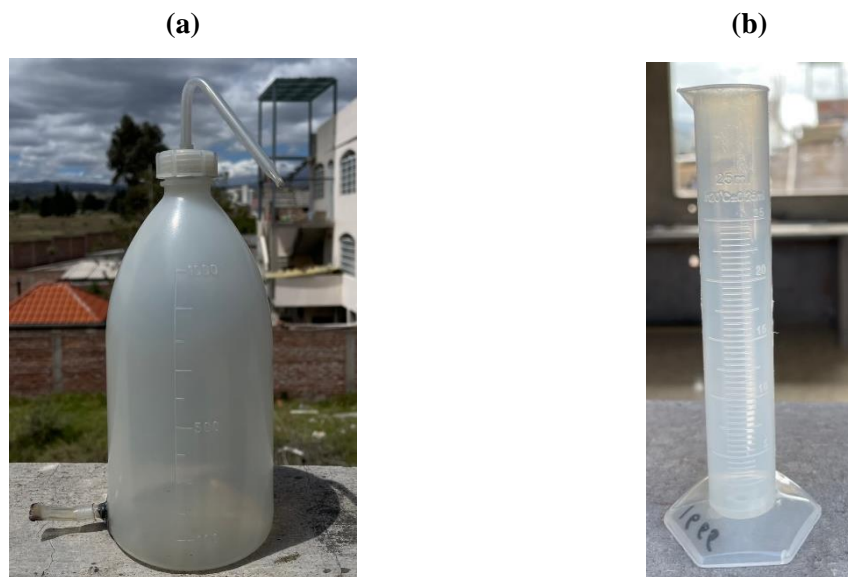
combustible graduado en mililitros; dicho recorrido tiene aproximadamente 13,30 kilómetros y para medir de manera precisa el consumo de combustible se utilizó una probeta graduada.

#### 3.5.4.2. Elementos para determinar el consumo de combustible

Para determinar el consumo de combustible del vehículo monoplaza es necesario recorrer una distancia determinada, por lo cual se llevó a cabo durante un ciclo de conducción urbano realizado en la Ciudad de Riobamba, consecuentemente se calcula el rendimiento del vehículo mediante la diferencia del volumen inicial y final, es decir, el contenido del reservorio antes y después del ensayo respectivamente, de manera que para una mayor comprensión la diferencia del volumen de gasolina consumido es expresado en un valor porcentual.

El instrumento utilizado para medir con precisión el consumo de combustible fue una probeta graduada, la cual es un instrumento volumétrico que tiene un cilindro con una escala que parte de 2,5 mililitros y hasta los 25 mililitros, es decir, que lleva grabada dicha escala en la parte exterior del instrumento. Cabe recalcar que la ruta recorrida se ejecuta para cada parámetro de entrada del tipo de sistema de alimentación.

Los elementos utilizados para la medición de consumo de combustible se detallan en la ilustración 3-20, en el anexo F se muestra el uso de aquellos elementos.



**Ilustración 3-20:** (a) Frasco graduado de 1000 mililitros, (b) Probeta graduada de 25 mililitros

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.4.3. Detalles de la ruta planificada

En el procedimiento de las pruebas de consumo de combustible se debe tener presente las distintas condiciones ambientales como temperatura, humedad y presión atmosféricas; por esta razón, dichas pruebas de consumo son realizadas en un día despejado con baja probabilidad de lluvia, en otras palabras, un excelente clima. Además, para la comparación de resultados es necesario realizar pruebas antes y después de la implementación del generador de hidrógeno.

La prueba de consumo de combustible se ha desarrollado en un ciclo de conducción urbano en la Ciudad de Riobamba en horas pico o de mayor tráfico a una altitud de aproximadamente 2750 metros sobre el nivel del mar. Además, se debe tener a consideración los siguientes parámetros: distancia, velocidad y tiempo, a esto se añade la inclinación de la carretera, las paradas y el tráfico vehicular. En el anexo G se muestra el proceso de evaluación del consumo de combustible siguiendo el ciclo de conducción.

Para el análisis de ruta se considera los siguientes puntos:

- a) Escuela Superior Politécnica del Chimborazo
  1. Punto de partida Entrada 1 ESPOCH.
  2. Gire a la izquierda en Av. Pedro Vicente.
  3. En la rotonda, continúa derecho por la 8 de julio.
  4. Gire levemente a la derecha.
  5. Gira a la izquierda con dirección a Tarqui.
  6. Gire a la izquierda con dirección a José Orozco.
  7. Gire a la izquierda con dirección a 5 de junio.
  8. Llegada al Parque Maldonado.
  
- b) Parque Maldonado
  1. Dirígete al suroeste por 5 de junio hacia la Primera Constituyente.
  2. Gira a la derecha con dirección a Primera Constituyente.
  3. Gire a la derecha con dirección a Eugenio Espejo.
  4. Gira a la izquierda con dirección a Junín.
  5. Gira a la derecha con dirección a Vicente Rocafuerte.
  6. Continúe recto hacia Av. Antonio José de Sucre.
  7. En la rotonda, continúa derecho por Av. Antonio José de Sucre/E490.
  8. En la rotonda, continúa derecho por Av. Antonio José de Sucre.
  9. En la rotonda, tome la cuarta salida y continúe por Av. Antonio José de Sucre.

10. Llegada al lugar: Av. Antonio José de Sucre.

c) Paseo Shopping

1. Dirígete hacia el sur por la Av. Antonio José de Sucre hacia Begonias.
2. En la rotonda, continúa derecho por Av. Antonio José de Sucre/E490.
3. En la rotonda, toma la primera salida en dirección a E490.
4. Continúa recto.
5. En la rotonda, toma la primera salida en dirección a Av. Canónigo Ramos.
6. Sal de la rotonda en Av. Canónigo Ramos.
7. En la rotonda, toma la tercera salida en dirección a St. Amand Montrond.
8. Gira a la derecha con dirección a Av. Pedro Vicente.
9. Llegada al lugar: Entrada 1 ESPOCH.

#### *3.5.4.4. Validación del ciclo de conducción urbano*

El ciclo de conducción urbano para determinar el consumo de combustible usando gasolina y una mezcla de gasolina con hidrógeno se basó en el trabajo de titulación de Calva y Flores (2020, pp. 24-25) perteneciente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de la ciudad de Riobamba, el cual fue realizado en horas pico, con el fin de lograr registrar las condiciones y circunstancias reales de tráfico.

#### **3.5.5. Prueba de funcionamiento para examinar la emisión de gases de escape**

##### *3.5.5.1. Analizador de gases de escape*

La última prueba de funcionamiento es analizar la emisión de gases de escape productos de la combustión de los dos tipos de sistemas de alimentación, el equipo a utilizar es un analizador de gases portátil auto plus de la marca Kane como se muestra en la ilustración 3-21, el cual se utiliza para medir la proporción en porcentajes de los compuestos químicos que son expulsados por el motor de combustión interna, ya que es importante tener en cuenta la concentración de los gases.

El analizador de gases permite detectar fallas u origen de la causa de aquella concentración, de manera que ofrece una garantía cuando el vehículo posee valores óptimos, y así asegurar que el vehículo apruebe la revisión vehicular, este instrumento posee una pantalla monocromática, además, es de fácil conexión a otros dispositivos, tiene un diseño compacto y control de la velocidad de la bomba que reduce el consumo de la batería.

El analizador de gases tiene un equipo adicional para poder imprimir con un cable USB o de forma inalámbrica los reportes del estado de los gases de escape del vehículo, es una impresora de tipo térmica como se muestra en la ilustración 3-21, además, es muy compacta y portátil. Por otra parte, se puede utilizar el software Kane Live en el ordenador, el cual permite visualizar gráficas de tendencias, guardar y descargar datos de la concentración de los gases, además de controlar la bomba del analizador; la conexión del equipo a otros dispositivos como computadoras, tabletas o teléfonos es muy sencilla a través de Bluetooth (GLOBALTECH, 2022).



**Ilustración 3-21:** Analizador de gases auto plus de la marca Kane

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

#### 3.5.5.2. Límites de contaminación en Ecuador

Se debe tener en cuenta los límites permisibles de la contaminación del aire en Ecuador, de acuerdo con el Instituto ecuatoriano de normalización (INEN), específicamente en la norma INEN 2 204 segunda revisión del 2017, la cual tiene como título “Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina”, es decir, que limita un porcentaje máximo de emisiones con motores alimentados a gasolina para pruebas estáticas, es decir, en marcha mínima o ralentí; además de indicar porcentajes límites en pruebas dinámicas.

En la tabla 3-4 se muestran valores límites de contaminación por monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) para pruebas estáticas de acuerdo con el año de fabricación del motor. También existe una tabla de límites máximos de emisiones para pruebas de movilidad dinámica para motores alimentados con gasolina, dichos ensayos siguen un ciclo de conducción, en otras palabras, para pruebas dinámicas.

De acuerdo con la normativa se tiene en cuenta el ciclo FTP 75 (fue creado en los Ángeles – EE. UU. en viaje de rutina para vehículo livianos) y ciclo transigente, es decir, que es una prueba dinámica, dicha norma expone que un vehículo de cierta categoría no podrá emitir al aire en cantidades superiores de contaminantes como se describen en la tabla 3-5, entran en regulación los modelos a partir del año 2000.

**Tabla 3-4:** Valores máximos de contaminación de la norma INEN 2 204 – Prueba estática

Año modelo	% CO <sup>a</sup>		ppm HC <sup>a</sup>	
	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

<sup>a</sup> Volumen  
<sup>b</sup> Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

Fuente: (INEN, 2017, p. 3)

En otras palabras, se realizan dos tipos de pruebas, de movilidad estática y dinámica siguiendo el ciclo de conducción en la ciudad de Riobamba, el cual es utilizado en la prueba de funcionamiento para evaluar el consumo de combustible antes y después de la implementación del generador de hidrógeno.

**Tabla 3-5:** Valores máximos de contaminación de la norma INEN 2 204 – Prueba dinámica

Categoría	50,000 millas/5 años				100,000 millas/10 años <sup>a</sup>			
	CO g/mi	THC g/mi	NMHC g/mi	NOx g/mi	CO g/mi	THC g/mi	NMHC g/mi	NOx g/mi
Vehículos de pasajeros	3,4	0,41	0,25	0,4	4,2	-	0,31	0,6
LLDT, LVW < 3750 lbs	3,4	-	0,25	0,4	4,2	0,80	0,31	0,6
LLDT, LVW > 3750 lbs	4,4	-	0,32	0,7	5,5	0,80	0,40	0,97
HLDT, ALVW < 5750 lbs	4,4	0,32	-	0,7	6,4	0,80	0,46	0,98
HLDT, ALVW > 5750 lbs	5,0	0,39	-	1,1	7,3	0,80	0,56	1,53

<sup>a</sup> Vida útil 120,000 millas/11 años para todos los estándares HLDT, THC y LDT.

Abreviaturas:  
PBV Peso bruto vehicular  
LVW Peso del vehículo cargado (tara + 300 lbs)  
ALVW LVW ajustado (promedio numérico de la tara y el PBV)  
LDT Camión ligero  
LLDT Camión liviano ligero (debajo de 6000 lbs PBV)  
HLDT Camión ligero pesado (sobre 6000 lbs PBV)

Fuente: (INEN, 2017, p. 4)

### 3.5.5.3. Normativa vigente en Ecuador

La normativa vigente de emisiones en Ecuador desde enero del 2017 es la EURO 3, dicha normativa entró en vigor con el fin de reducir el impacto ambiental que los vehículos a gasolina y diésel producen tras la combustión. La unión europea fue quien decidió introducir estándares para reducir los gases contaminantes producidos por automóviles, ya que dichos gases son perjudiciales para la salud de todos los seres vivos, la norma más reciente es la EURO 6 que fue implementada el 1 de septiembre del 2015. La normativa EURO 3 se incluye en Europa en enero del 2000, la cual establece una reducción del 64% de monóxido de carbono (CO), 33% de hidrocarburos y 50% de óxidos de nitrógeno (NOx) (Pesantes et al, 2021, pp. 973-974).

### 3.5.5.4. Concentraciones de las emisiones de gases de escape

Los gases contaminantes más significativos de la combustión en vehículos de transporte terrestre son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx); asimismo es importante considerar el factor lambda que se relaciona con las concentraciones de los gases de escape emitidos por el motor, de tal manera que, si se tiene un valor de 1, indica que la mezcla de la combustión fue estequiométrica (teóricamente igual), si es menor a 1, la mezcla es rica en gasolina, pero si es mayor a 1, la mezcla es pobre en gasolina.

Los gases contaminantes productos de la combustión de un vehículo se describen a continuación:

- CO<sub>2</sub>: el dióxido de carbono es origina comúnmente por la quema de combustible. Este gas es principal responsable de causar el efecto invernadero, en otras palabras, es el causante del calentamiento global. Para los seres vivos no es tóxico, pero si causa malestar de tal manera que concentraciones muy altas produce inconformidad.
- CO: cuando la combustión es incompleta se genera el monóxido de carbono, debido al bajo nivel de oxígeno. Este gas contribuye a la formación de gases de efecto invernadero, además, es un gas muy tóxico para los seres vivos, ocasionando problemas respiratorios.
- HC: los hidrocarburos se producen cuando el combustible no se quema por completo, generando una mala combustión en el encendido y compresión del motor. Los hidrocarburos que no son quemados producen efectos muy perjudiciales en el sistema respiratorio y visual; además este compuesto es capaz de producir cáncer.
- NOx: las altas emisiones de este compuesto son provocadas cuando la mezcla de aire y combustible del motor es muy pobre en gasolina. El NOx es un gas muy peligros para salud por su alta toxicidad que afecta a los pulmones, piel y ojos.

### 3.5.5.5. Analizador de encendido y tacómetro digital

Por otra parte, se necesita de un instrumento que permita visualizar las revoluciones por minuto (rpm), ya que las pruebas estáticas se realizan bajo dos rangos importantes de funcionamiento, los cuales son: entre 0 a 1.500 rpm y 1.500 a 3.000 rpm. Un analizador de encendido y tacómetro digital de la marca General Technologies Corp (GTC, 2021) modelo TA100 SmarTach+ es el instrumento que se utiliza para medir los rpm del motor mediante una antena que posee un sensor especial como se muestra en la ilustración 3-22.



**Ilustración 3-22:** Analizador de encendido y tacómetro digital GTC TA100 SmarTach+

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

El sensor del instrumento permite una conexión rápida y sencilla en los cables de bujía, se debe tener en cuenta que el cable de la bujía que se desea analizar este correctamente presionado sobre el sensor para asegurar una adecuada lectura de los rpm como se muestra en la ilustración 3-23 literal a. Previamente se debe configurar el instrumento de acuerdo con el número de ciclos (motor de cuatro tiempos) y cilindros (motor mono cilíndrico) como se representa en la ilustración 3-23 literal b. En el anexo H se muestra el proceso de medición de las revoluciones por minuto.



**Ilustración 3-23:** (a) Conexión del sensor al cable de la bujía; (b) Configuración del número de ciclos y cilindros

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

### 3.5.5.6. Proceso de evaluación de la concentración de gases

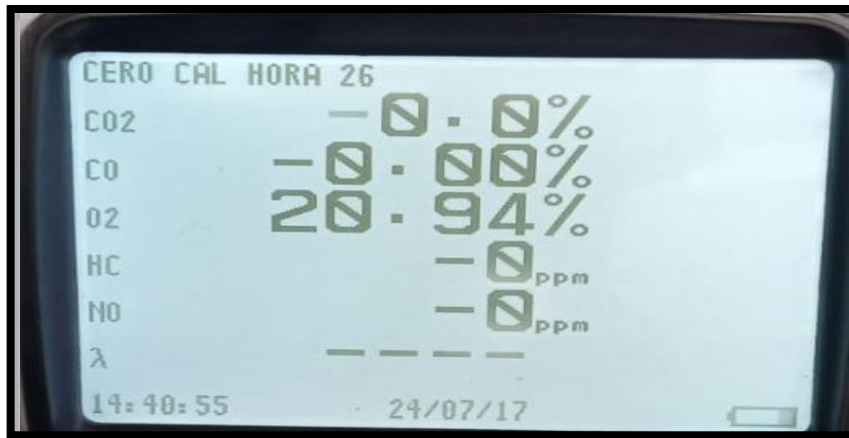
El ensayo de funcionamiento se realiza de cada parámetro de entrada del tipo de sistema de alimentación, que su vez se ejecutan dos pruebas tanto la estática y dinámica para los dos parámetros de entrada independientes, primero que sugiere el manual de Kane (2013, pp. 8-11) cada vez se utiliza el analizador es tener en cuenta los siguientes puntos antes de iniciar el proceso de medición:

- El filtro de partículas se encuentre seco, sin daños y limpio.
- La trampa de agua y sonda no contenga ninguna partícula de agua.
- La conexiones y estado físico de las mangueras del equipo.
- La sonda tome muestras de aire puro.
- La posición del instrumento debe estar en vertical.

Luego se debe calibrar el equipo mediante una secuencia de bombeo de aire limpio dentro de los sensores para reiniciar los valores predeterminados como el oxígeno en 20,9% y la concentración de emisiones de los siguientes compuestos: CO, HC y CO<sub>2</sub>, los cuales deben tener una concentración del 0% cuando los datos sean reiniciados. El tiempo de iniciación esta prefijado por el equipo, al encenderlo inicia una cuenta regresiva donde el instrumento controla la tasa de flujo y empezara con el proceso de medición, en el cual no se debe obstruir el extremo de la sonda, 90 segundos es el tiempo que le tomará al analizador reiniciar sus parámetros en valores predeterminados como se muestra en la ilustración 3-24. Cuando se requiera reiniciar los valores,



en la esquina superior izquierda de la pantalla mostrará “Cero requerido” que permite la configuración a cero de todos los parámetros, tomará 30 segundos en llegar a cero.



**Ilustración 3-24:** Valores predeterminados luego de la calibración inicial

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Posteriormente el analizador está listo para usarse, y se procede a configurar la velocidad de la bomba, el método de comunicación de la impresora, unidades de los parámetros, combustible, vehículo, lambda de la sonda, entre otros. El equipo permite guardar los reportes de las pruebas de funcionamiento para luego imprimirlos. Una vez culminado el proceso de calibración a cero y configuración del instrumento, la sonda puede ser insertada en el escape del vehículo determinado, y se asegura que la pinza esté sujeta al caño de escape o en el chasis del vehículo como se muestra en la ilustración 3-25.



**Ilustración 3-25:** Conexión de la sonda en el tubo de escape

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Se debe encender la bomba para extraer los gases de escape solo cuando se realiza las mediciones para evitar la descarga prematura de la batería, el fabricante recomienda que el analizador tome muestras de aire limpio durante un minuto antes de apagar la bomba. Luego se procede a realizar las mediciones de los gases emitidos por el motor de la motocicleta sometido a los dos tipos de sistemas de alimentación, y de las dos pruebas de movilidad (estática y dinámica).



**Ilustración 3-26:** Caballete de motocicleta

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En las pruebas estáticas se utiliza un caballete de moto para poder levantar la rueda motriz del vehículo, aquella herramienta se muestra en la ilustración 3-26, con el analizador de encendido y tacómetro digital se fijan las revoluciones por minuto (RPM), la cuales son dos rangos de RPM, la primera condición se establece entre 800 a 900 RPM (es decir ralentí) y la segunda es entre 2.000 a 2.500 RPM. La siguiente prueba es la dinámica, la cual se la realiza siguiendo el ciclo de conducción utilizado para evaluar el consumo de combustible de dicha prueba de funcionamiento. Finalmente, luego de realizar las pruebas y registrar los datos de las concentraciones de los gases de escape, se retira la sonda del escape con mucho cuidado, ya que estará caliente y se debe enfriar naturalmente sin sumergirla en algún fluido, caso contrario se dañará la bomba y los sensores del instrumento.

#### *3.5.5.7. Validación del analizador de gases*

La emisión de gases producido por el vehículo monoplaza se estimó a partir de los siguientes instrumentos:

- Analizador de gases Kane autoplus, capaz de medir porcentajes de los compuestos químicos emitidos por el escape de un motor de combustión interna, bajo los estándares de OIML

Class1; es decir, el estándar que define la precisión, rendimiento y funcionalidad de los equipos de control de gases en Europa.

- Tacómetro TA100 SmarTach es un medidor de RPM con un sensor especial de conexión rápida a los cables de bujía.

Estos instrumentos son proporcionados por el laboratorio de la carrera de Ingeniería Automotriz perteneciente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de la ciudad Riobamba.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados mediante una síntesis de cada uno de los objetivos planteados, en donde se muestran los resultados de la adaptación del generador de hidrógeno, asimismo de cada una de las pruebas de funcionamiento para evaluar el rendimiento del motor, consumo de combustible y concentración de gases de escape del vehículo monoplaza. Los ensayos de funcionamiento tienen la finalidad de evaluar y demostrar si existe una mejora de las tres pruebas destacables previamente descritas, lo cual se lo realiza mediante una comparación de un antes y después de la implementación del generador de hidrógeno, esto se lo realiza a través de gráficas y tablas que representan las curvas de potencia y torque, porcentajes del consumo de combustible y concentraciones de los gases de escape producto de la combustión del motor. Esta información es importante para validar y argumentar los objetivos, además de responder las preguntas de la sección “1.3 Problema General de Investigación” y “1.4 Problemas Específicos de Investigación”, los cuales fueron planteadas en el primer capítulo de esta investigación.

#### 4.1. Adaptación del generador de hidrógeno

La adaptación del generador de hidrógeno en un vehículo monoplaza fue exitosa, se debe considerar que antes de la implementación todos los elementos involucrados deben estar en óptimas condiciones, tales como el sistema eléctrico, múltiple de admisión, carburador, sistema aceleración y el motor del vehículo; en el anexo I se muestra el resultado final de la implementación de generador de hidrógeno en un vehículo monoplaza.

El primer parámetro necesario es saber cuánto hidrógeno en forma gaseosa está entrando al múltiple de admisión, por esta razón se realizó un promedio de la velocidad de salida de la producción de hidrógeno mediante un testo, dicho parámetro en conjunto con la temperatura y presión del flujo de producción son indispensables para hallar el flujo másico del generador de hidrógeno, el proceso de medición se describe en la sección “3.5.1.4 Flujo másico de producción de hidrógeno” de la presente investigación. Cabe recalcar que el flujo másico de producción del generador es una mezcla de hidrógeno y oxígeno, la mezcla se debe a polo negativo y positivo respectivamente, cada polo de las celdas del generador de hidrógeno es el encargado de separar las moléculas de agua en un gas particular.

En la tabla 4-1 se muestra el valor de las mediciones realizadas y el promedio de estas, la cual se obtiene una velocidad promedio de 302,24 pies por minuto o 1,5354 metros por segundo, y la manguera utilizada para transportar el hidrógeno hasta el múltiple de admisión es de ¼ de pulgada (6,3 milímetros) de diámetro externo e interno de 4,1 milímetros (0,0041 metros). Mediante la ecuación 7 se determinan el área de la manguera, por lo tanto, se tiene un valor de  $1,3202 * 10^{-5}$  metros cuadrados ( $m^2$ ).

**Tabla 4-1:** Mediciones de velocidad del flujo de hidrógeno

Medición	Velocidad (ft/min)
1	302,30
2	302,30
3	302,20
4	302,20
5	302,20
6	302,20
7	302,30
8	302,30
9	302,30
10	302,10
<b>Promedio</b>	<b>302,24 (1,5354 m/s)</b>

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

De acuerdo con la escala de Beaufort de la tabla 3-2, se compara la velocidad de 1,5354 metros por segundo de la producción del generador de hidrógeno con la escala 1 de 1,5 metros por segundo, aquella velocidad se clasifica como aire ligero, por esta razón se puede considerar que la velocidad de producción es la correcta y por ende su flujo másico.

Se utiliza la ecuación 7 para hallar el área de la manguera como se describió anteriormente:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (0,0041m)^2}{4}$$

$$A = 1,3202 * 10^{-5} m^2$$

Se debe tener en cuenta que el generador produce una mezcla de hidrógeno y oxígeno, debido a la reacción de polos, las placas negativas son las encargadas de separar el hidrógeno (H2) y las positivas el oxígeno (O2), por esta razón se debe calcular dos densidades (H2 y O2) mediante la

ecuación 8, por ende, existe una variación en la fórmula de densidad del gas, siendo la masa molar aquello que varía dependiendo del gas.

Los valores de entrada para calcular la densidad de un gas son: presión ( $9,869 * 10^{-6} atm$ ), masa molar del gas deseado ( $H_2: 2,014 \frac{g}{mol}$ ,  $O_2: 31,999 \frac{g}{mol}$ ), constante de los gases ( $0,0821 \frac{atm * l}{K * mol}$ ) y temperatura ( $296 K$ ); para el valor de la temperatura se utilizó un promedio de 10 mediciones como se muestra en la tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Temperatura promedio del flujo másico de producción del generador de hidrógeno

Medición	Temperatura (°C)
1	22,6
2	22,6
3	22,5
4	22,4
5	22,4
6	22,5
7	22,4
8	22,5
9	22,6
10	22,5
<b>Promedio</b>	<b>22,5 °C (296 K)</b>

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Primero se calcula la densidad del hidrógeno ( $H_2$ ) mediante la ecuación 8, dicho proceso se presenta a continuación:

$$d = \frac{P * M(H_2)}{R * T}$$

$$d = \frac{(9,869 * 10^{-6} atm) * (2,014 \frac{g}{mol})}{(0,0821 \frac{atm * l}{K * mol}) * (22,5 K)}$$

$$d = 8,179 * 10^{-7} \frac{g}{l} \text{ o } \frac{kg}{m^3}$$

Luego se calcula la densidad del oxígeno ( $O_2$ ) mediante la ecuación 8, el proceso se presenta a continuación:

$$d = \frac{P * M(O_2)}{R * T}$$

$$d = \frac{(9,869 * 10^{-6} atm) * (31,999 \frac{g}{mol})}{(0,0821 \frac{atm * l}{K * mol}) * (22,5 K)}$$

$$d = 1,299 * 10^{-5} \frac{g}{l} \text{ o } \frac{kg}{m^3}$$

Posteriormente con las densidades del gas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), se procede a calcular el flujo másico de estos elementos mediante la ecuación 9, además, como es una mezcla de ambos gases, se debe multiplicar su valor porcentual, ya que es la concentración de aquel elemento, el cual fue medido con testo 340, de tal forma que se obtiene un valor porcentual de 20,80% de oxígeno y 79,20% de hidrógeno, considerando un 100% de la mezcla de estos gases. Mediante la ecuación 9 se obtiene el flujo másico del hidrógeno (H<sub>2</sub>) como se muestra a continuación:

$$m_f = d(H_2) * A * v$$

$$m_f = (8,179 * 10^{-7} \frac{kg}{m^3}) * (1,3202 * 10^{-5} m^2) * (1,5354 \text{ m/s})$$

$$m_f = 1,658 * 10^{-11} \frac{kg}{s} * (0,792)$$

$$m_f = 1,313 * 10^{-11} \frac{kg}{s}$$

De tal forma, para obtener el flujo másico del oxígeno (O<sub>2</sub>) se utiliza la ecuación 9 como se muestra a continuación:

$$m_f = d(O_2) * A * v$$

$$m_f = (1,299 * 10^{-5} \frac{kg}{m^3}) * (1,3202 * 10^{-5} m^2) * (1,5354 \text{ m/s})$$

$$m_f = 2,634 * 10^{-10} \frac{kg}{s} * (0,208)$$

$$m_f = 5,479 * 10^{-11} \frac{kg}{s}$$

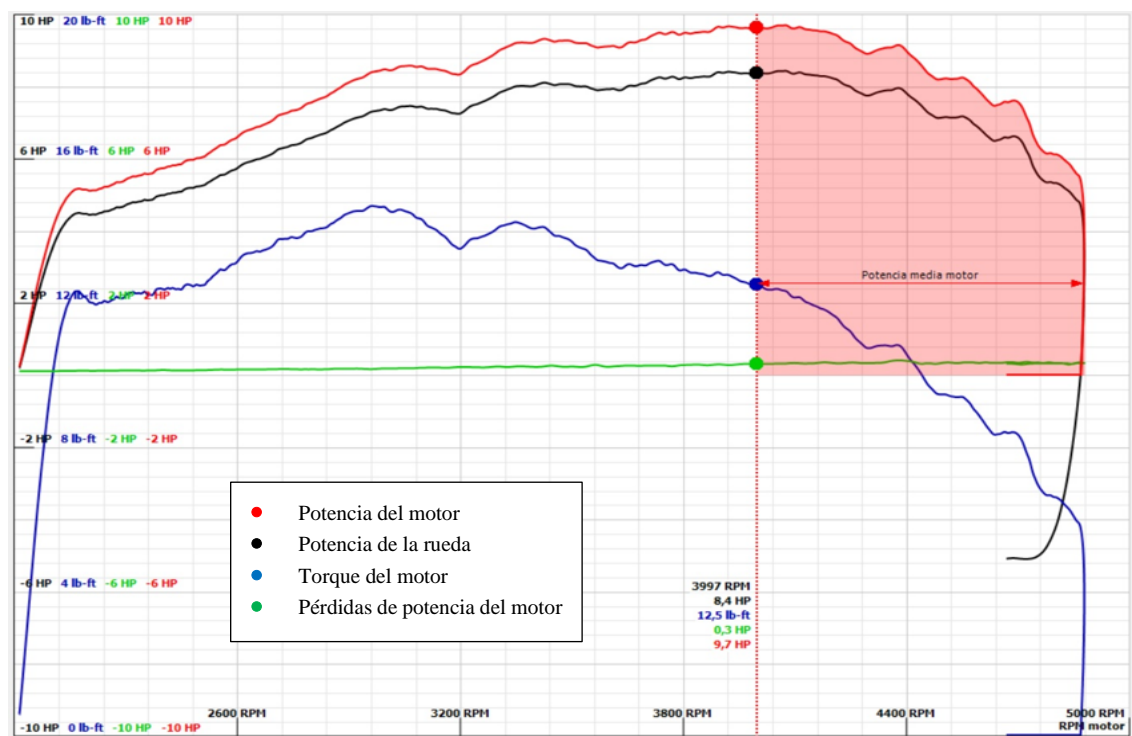
Finalmente se obtiene el flujo másico de la mezcla, pero por cada gas que este contiene; por consiguiente, se consigue un valor de  $1,313 * 10^{-11} \text{ kg/s}$  para el hidrógeno (H<sub>2</sub>) y  $5,479 * 10^{-11} \text{ kg/s}$  para el oxígeno (O<sub>2</sub>), al sumar estos dos valores se estima el flujo másico de la mezcla, el cual es de  $6,792 * 10^{-11} \text{ kg/s}$ , dicha cantidad de flujo es la entra por el múltiple de admisión para posteriormente ser quemada dentro del motor del vehículo monoplaza.

En las investigaciones previas sobre implementar un generador de hidrógeno a un vehículo, no mencionan un flujo másico de producción como se realizó en este proyecto, no obstante Baltazar (2020, pp. 145-148) demuestra que la producción de hidrógeno se puede determinar mediante un cálculo de moles y masa en gramos, cada uno de dichos cálculos varía debido a la capacidad de producción del generador en amperios por hora y el nivel de alimentación en voltios.

## 4.2. Rendimiento del motor

Las pruebas de funcionamiento del rendimiento del motor se efectúan para conocer la potencia y torque del motor, que se representan en las siguientes gráficas mediante curvas de color rojo y azul respectivamente, también se representa el comportamiento de la potencia de la rueda y pérdidas de potencia mediante curvas que se representan con los colores negro y verde respectivamente; el sistema de coordenadas de las gráficas representa en el eje “x” las revoluciones por minuto (rpm) y en el eje “y” la potencia y torque en caballos de fuerza (HP) y libras fuerza por pie (lb-ft).

El software de Motorroll es capaz de resumir los valores más relevantes de la prueba en una tabla de datos; la cual contiene la potencia máxima del motor y rueda, potencia media perdida, potencia media del motor, torque máximo del motor, tiempo de aceleración, tiempo total de la tirada y el método de medición.



**Ilustración 4-1:** Curvas de potencia y torque del vehículo alimentado con gasolina

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.



Potencia máxima motor:	9,7 HP (4076 RPM)
Potencia máxima rueda:	8,4 HP (4076 RPM)
Potencia media pérdida:	-1,3 HP
Potencia media motor:	7,7 HP (4000 RPM - 5500 RPM)
Torque máximo motor:	14,69 lb-ft (2963 RPM)
Tiempo de aceleración:	19,61 seg
Tiempo total de tirada:	21,55 seg
Método de medición:	Inercial + freno

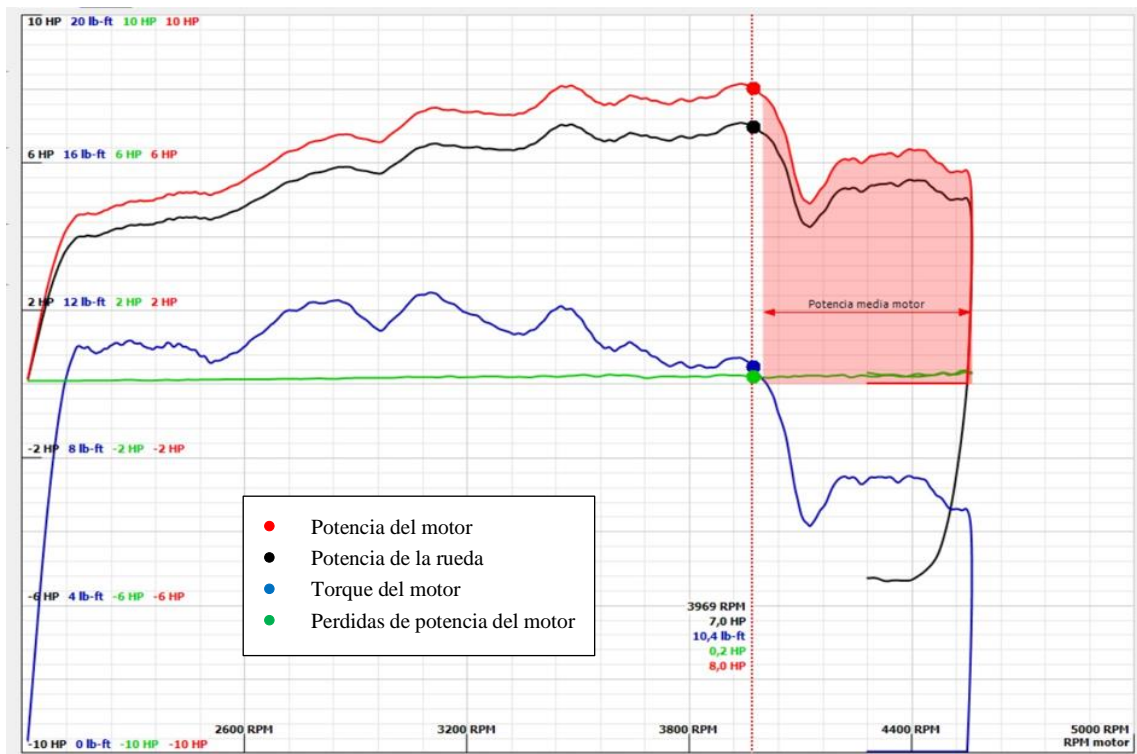
**Ilustración 4-2:** Resumen de datos relevantes de la prueba con alimentación de gasolina

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En la ilustración 4-1 se muestran los resultados máximos obtenidos cuando el vehículo monoplaza tiene un sistema de alimentación únicamente con gasolina, la curvas de potencia y torque tiene un comportamiento levemente inestable debido a que fueron recolectados de ensayos experimentales, es decir, son datos reales obtenidos del vehículo monoplaza, por esta razón aquellas curvas están expuestas a pérdidas debido a la adherencia de la rueda, maniobrabilidad del conductor, desgaste de los componentes del vehículo y desgaste de los rodillos del dinamómetro.

Por esta razón en la ilustración 4-2 se muestra los datos más importantes sobre las curvas de potencia y torque de dicho ensayo, donde se evidencia una potencia máxima del motor de 9,7 caballos de fuerza (HP) y una potencia máxima de la rueda de 8,4 HP a 4.076 revoluciones por minuto (rpm), de manera que la diferencia promedio de aquellas potencias es de 1,3 HP. Por otra parte, el software presenta una potencia media del motor de 7,7 HP de entre 4.000 y 5.500 rpm, la potencia baja considerablemente debido a que antes de los 5.000 rpm la potencia del motor desciende a cero.

Además, posee un torque máximo de 14,69 libra fuerza por pie (lb\*ft) o 19,92 newton por metro (N\*m) a 2.963 rpm, este ensayo se realizó 21,55 segundos desde que se aceleró paulatinamente hasta que los rodillos del dinamómetro dejaron de moverse, de entre aquel tiempo 19,61 segundos fueron de una aceleración positiva hasta aproximadamente los 5.000 rpm donde la potencia y torque descienden drásticamente como se muestra en la ilustración 4-1.



**Ilustración 4-3:** Curvas de potencia y torque del vehículo alimentado con una mezcla de hidrógeno gaseoso y gasolina

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Potencia máxima motor:	8,1 HP (3941 RPM)
Potencia máxima rueda:	7,1 HP (3941 RPM)
Potencia media pérdida:	-1,3 HP
Potencia media motor:	5,8 HP (4000 RPM - 5500 RPM)
Torque máximo motor:	12,47 lb-ft (3103 RPM)
Tiempo de aceleración:	20,14 seg
Tiempo total de tirada:	22,40 seg
Método de medición:	Inercial + freno

**Ilustración 4-4:** Resumen de datos relevantes de la prueba con alimentación de una mezcla de hidrógeno gaseoso y gasolina

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En la ilustración 4-3 se presentan los resultados máximos obtenidos cuando el vehículo monoplaza tiene un sistema de alimentación que suministra un mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, el comportamiento de las curvas de potencia y torque son muy inestable, en especial a partir de las 4.000 revoluciones por minuto donde hay un declive drástico, esto posiblemente se

debe a las pérdidas explicadas previamente en el anterior ensayo, en particular a la maniobrabilidad del conductor que es lo que puede ocasionar un descenso muy precipitado.

Por consiguiente, en la ilustración 4-4 se evidencia los datos más relevantes sobre las curvas de potencia y torque del presente ensayo, por lo cual aquella ilustración se manifiesta una potencia máxima del motor de 8,1 caballos de fuerza (HP) y una potencia máxima de la rueda de 7,1 HP a 3.941 rpm, de manera que la diferencia promedio de aquellas potencias es de 1,3 HP. Asimismo, el software presenta una potencia media del motor de 5,8 HP de entre 4.000 y 5.500 rpm, la potencia baja considerablemente debido a que antes de los 5.000 rpm la potencia del motor desciende a cero, sucede lo mismo en el anterior ensayo que utiliza únicamente gasolina.

Además, posee un torque máximo de 12,47 libra fuerza por pie (lb\*ft) o 16,91 newton por metro (N\*m) a 3.103 rpm, este ensayo se realizó 22,40 segundos desde que se aceleró paulatinamente hasta que los rodillos del dinamómetro dejaron de moverse, de entre aquel tiempo 20,14 segundos fueron de una aceleración positiva hasta los 5.000 rpm aproximadamente donde la potencia y torque descienden drásticamente como se muestra en la ilustración 4-3.

**Tabla 4-3:** Comparación de la potencia y torque de los dos sistemas de alimentación

Datos relevantes	Gasolina	Mezcla de hidrógeno y gasolina
Potencia máxima del motor (HP)	9,70	8,10
Potencia máxima de la rueda (HP)	8,40	7,10
Torque máximo del motor (Nm)	19,92	16,91

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En la tabla 4-3 se presenta una comparación de la potencia y torque tanto para el sistema de alimentación únicamente con gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina. En primer lugar, se evidencia una reducción de la potencia del motor y de la rueda, la cual es de 1,60 HP y 1,30 HP respectivamente. Además, existe una reducción significativa del torque del motor, la cual es de 3,01 Nm, considerando que el vehículo monoplaza es una motocicleta, perder más de 1 HP de potencia y 3 Nm de torque es muy perjudicial, a razón del bajo cilindraje (150 centímetros cúbicos) y el número de cilindros (mono cilindro) del vehículo sometido en este estudio.

Si se toma en cuenta la potencia máxima de la ficha técnica de la tabla 3-3, se tiene 12 HP a 7.000 rpm, en comparación a los datos reales y técnicos expresados por el fabricante, se obtiene una diferencia de 2,3 HP y 2.924 rpm en el ensayo de alimentación únicamente por gasolina. Y para el ensayo de una mezcla de hidrógeno gaseoso y gasolina, se consigue una diferencia 3,9 HP y

3.059 rpm. Sin embargo, en la ficha técnica no se muestra el torque del vehículo para realizar una comparación con los datos reales del estudio.

Además, en las investigaciones previas que implementan un generador de hidrógeno no se muestran pruebas de funcionamiento para evaluar el rendimiento del motor mediante curvas de potencia y torque; no obstante, mencionan una reducción de potencia, pero sin justificar la idea expuesta.

Para cada ensayo de funcionamiento del tipo de sistema de alimentación se realizan dos pruebas y se escogió la que obtuvo un valor máximo, luego de que el motor haya alcanzado la temperatura óptima de funcionamiento, las gráficas con las curvas de potencia y torque mínimo del uso de únicamente gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, se muestran en el anexo J y anexo K respectivamente.

#### 4.3. Consumo de combustible

Las pruebas de funcionamiento para evaluar el consumo de combustible, las cuales se realizan siguiendo un determinado ciclo de conducción en la ciudad de Riobamba, con la finalidad de demostrar si existe un ahorro de combustible al implementar un generador de hidrógeno gaseoso, los datos de dichas pruebas fueron recolectados e interpretados en valores porcentuales como se explicó en la sección “3.5.3.2 Elementos para determinar el consumo de combustible”.

**Tabla 4-4:** Porcentajes de consumo de combustible de una alimentación únicamente de gasolina

N.º de pruebas	Porcentaje de consumo (%)
1	83,75
2	82,65
3	83,41
4	84,20
5	82,54
6	83,15
7	82,35
8	82,54
9	83,80
10	83,68
<b>Promedio</b>	<b>83,21</b>

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

**Tabla 4-5:** Porcentajes de consumo de combustible con una alimentación de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina

N.º de pruebas	Porcentaje de consumo (%)
1	70,12
2	67,84
3	68,52
4	68,74
5	69,89
6	68,23
7	68,46
8	69,78
9	70,35
10	68,88
<b>Promedio</b>	<b>69,08</b>

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

De acuerdo con el consumo de combustible de las pruebas de funcionamiento tanto con alimentación únicamente con gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina como se muestra en la tabla 4-4 y 4-5 respectivamente, de las diez pruebas realizadas se obtiene un promedio de cada parámetro. Se demuestra que existe un mayor consumo cuando solo se suministra gasolina con valor del 83,21%, caso contrario cuando la alimentación del vehículo es por una mezcla de hidrógeno con gasolina, donde se obtiene un valor del 69,08%. Finalmente, para conocer el ahorro de combustible luego de la implementación del generador de hidrógeno se realiza una diferencia de ambos valores porcentuales, de tal forma que se tiene un ahorro del 14,13%.

**Tabla 4-6:** Comparación de consumo y costos de los tipos de alimentación

Alimentación	Consumo de combustible por kilómetro (gal/km)	Ahorro de combustible por kilómetro (\$/km)
Gasolina	0,013	0,032
Hidrógeno con gasolina	0,011	0,026

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En la tabla 4-6 se realiza una comparación del consumo promedio por galón tanto para un sistema de alimentación únicamente con gasolina y de una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, el cual se obtuvo una reducción de 0,002 galones por kilómetro; asimismo se tiene en cuenta los 13,30 kilómetros del ciclo de conducción en la ciudad de Riobamba para poder obtener el consumo de combustible por galón. Para determinar el ahorro de combustible se debe tener

presente el precio del galón de la gasolina Extra que es de 2,40 dólares y del consumo de combustible durante las diferentes pruebas para realizar una relación y obtener el ahorro de costos del combustible por kilómetro, dicha reducción es de 0,006 dólares por kilómetro.

**Tabla 4-7:** Estimación de ahorro del combustible durante un año

	<b>Diario</b>	<b>Semanal</b>	<b>Mensual</b>	<b>Anual</b>
Estimación del kilometraje (km)	20,000	140,000	560,000	6720,000
Gasolina (\$)	0,635	4,442	17,770	213,239
Hidrógeno con gasolina (\$)	0,527	3,688	14,753	177,037
<b>Ahorro de combustible (\$)</b>	<b>0,108</b>	<b>0,754</b>	<b>3,017</b>	<b>36,201</b>

**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

Para una mayor comprensión del 14,13% de ahorro de combustible se realiza una estimación de costos diario, semanal, mensual y anual con una consideración promedio de 20 kilómetros diarios de recorrido como se muestra en la tabla 4-7, el ahorro de combustible más notable es el anual, siendo de 36,201 dólares. Cabe recalcar que el ahorro del 14,13% parte del 83,21% del consumo de únicamente gasolina y no de un 100%, de tal forma que con una regla de tres se estima los costos de ahorro luego de la implementación del generador de hidrógeno.

De acuerdo a la ficha técnica del motocicleta de la tabla 3-3, entre aquellos datos destaca el rendimiento del vehículo con 150 kilómetros por galón cuando la motocicleta es nueva; no obstante se necesita conocer el consumo actual del vehículo, mediante las pruebas de consumo de combustible antes y después de la implementación del generador de hidrógeno, se obtiene un rendimiento de 75,63 y 91,10 kilómetros por galón respectivamente, es una reducción significativa debido al desgaste de la motocicleta, ya que según su matrícula es del año 2017. A pesar del rendimiento actual, al implementar un generador de hidrógeno se obtiene un incremento del rendimiento de 15,47 kilómetros por galón.

Al realizar una comparación sobre el ahorro del consumo de combustible en otras investigaciones, el trabajo de investigación de Borja, Borja y Castro (2014, pp.83-84) obtienen un ahorro de combustible del 11% en un vehículo FIAT Fiorino, el cual es un valor próximo al ahorro obtenido en el presente proyecto de investigación, cabe considerar que la limitación de este proyecto fue implementar un generador de hidrógeno en un vehículo monoplaza, por lo cual este tipo de vehículos tienen un menor consumo en consideración de los vehículos multiplaza.

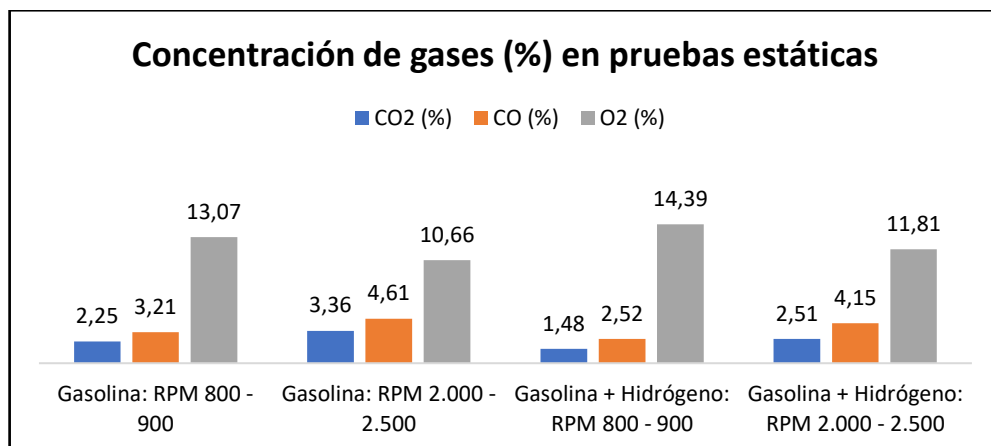
#### 4.4. Concentración de gases de escape

Las pruebas de funcionamiento para medir la concentración de gases, permite analizar los porcentajes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O<sub>2</sub>), además se examinan los hidrocarburos no quemados, pero en unidad de partes por millón (PPM), y el factor lambda que es un valor adimensional. Cada una de las causas y efectos de las concentraciones es explicada en la sección “3.5.4.4 Concentraciones de las emisiones de gases de escape”.

Por consiguiente, dichas pruebas se categorizan en dos tipos, en pruebas estáticas que se realizan a su vez en dos rangos de revoluciones por minuto (RPM), los cuales son en ralentí entre 800 a 900 RPM y entre 2.000 a 2.500 RPM. Y las pruebas dinámicas son realizadas mediante la ejecución de un ciclo de conducción; los dos tipos de alimentación implementados en este proyecto investigación son necesarios para la comparación de los resultados de aquellos ensayos, en la sección “3.5.4.6 Proceso de evaluación de la concentración de gases” se explica a detalle los procesos para la evaluación de gases de escape del vehículo monoplaza.

En la ilustración 4-5 se compara el promedio de las concentraciones porcentuales del CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub> en pruebas estáticas, se analiza que existe una reducción de dichos gases como se muestra a continuación:

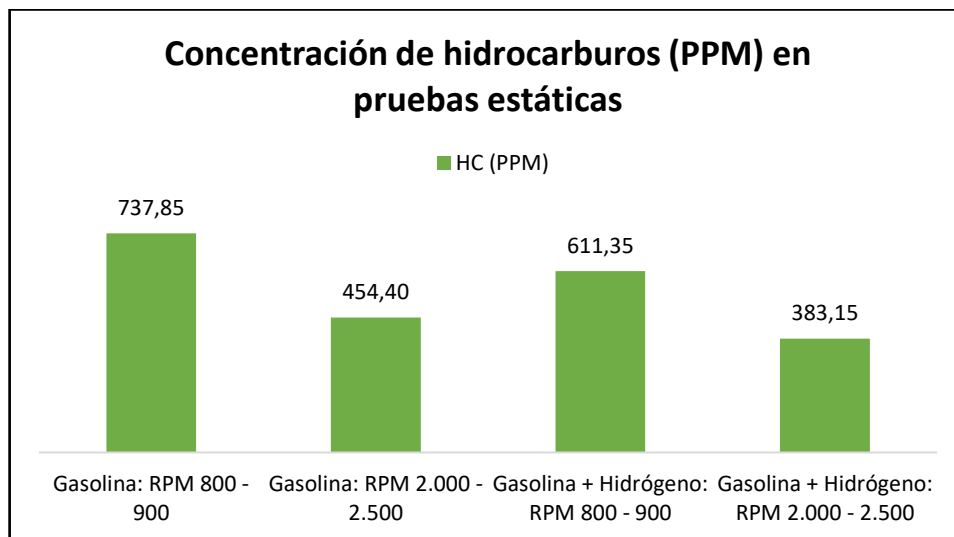
- CO<sub>2</sub>: 0,77% (800 a 900 RPM) y 0,85% (2.000 a 2.500 RPM).
- CO: 0,68% (800 a 900 RPM) y 0,47% (2.000 a 2.500 RPM).
- O<sub>2</sub>: a excepción de este gas que aumenta 1,32% (800 a 900 RPM) y 0,47% (2.000 a 2.500 RPM).



**Ilustración 4-5:** Porcentajes promedios de las concentraciones de gases emitidos en pruebas estáticas

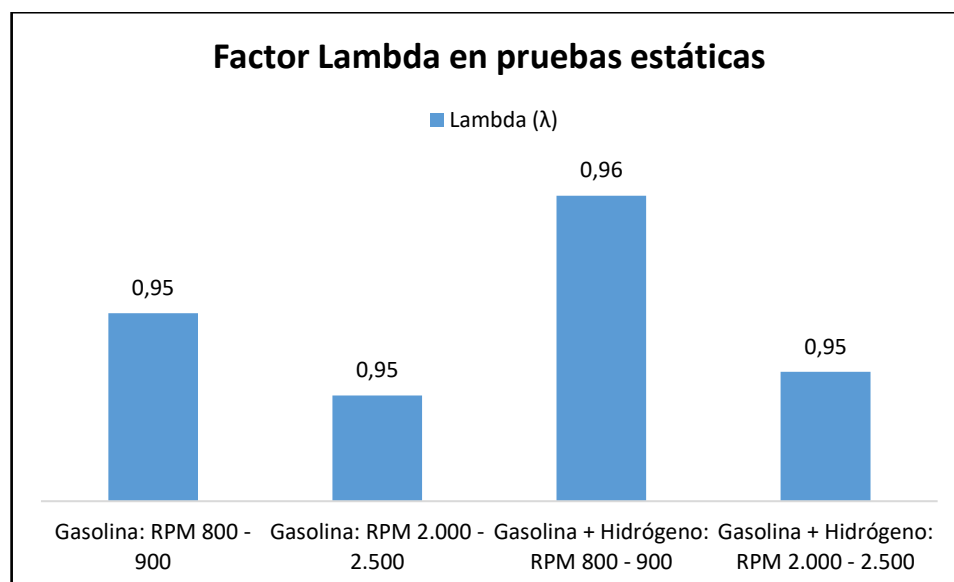
Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

La ilustración 4-6 se describe la concentración de hidrocarburos no quemados obtenidos en pruebas estáticas, la comparación se realiza mediante una diferencia de los valores en unidades de PPM, como resultado se obtiene una reducción 126,50 PPM en un rango de 800 a 900 RPM y 71,25 PPM entre un rango de 2.000 a 2.500 RPM. Con respecto al factor lambda en las pruebas estáticas, este varía entre 0,95 y 0,96 como se muestra en la ilustración 4-7, lo que indica que la relación de aire – combustible contiene una mezcla rica en gasolina.



**Ilustración 4-6:** Partes por millón de hidrocarburos no quemados de los gases de escape en pruebas estáticas

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.



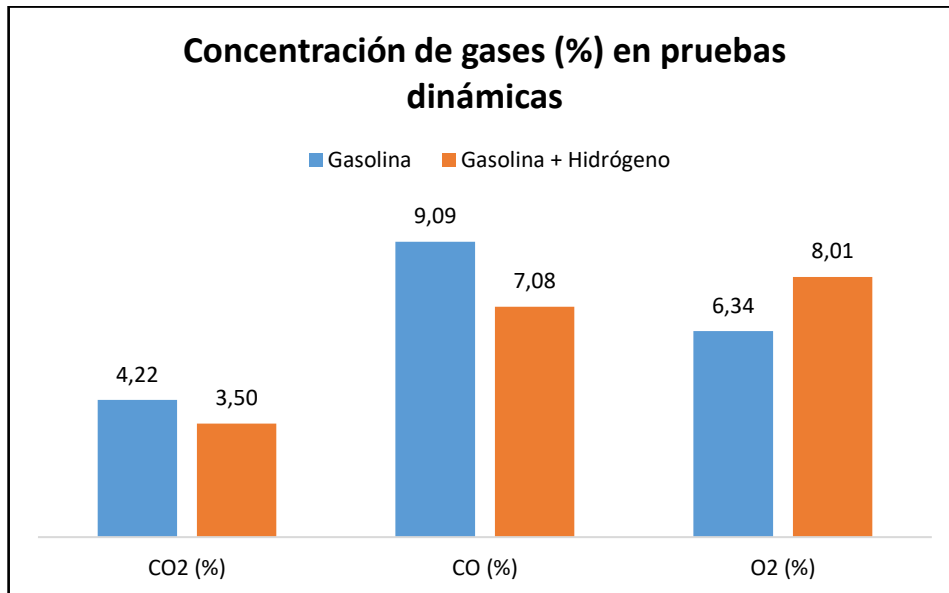
**Ilustración 4-7:** Factor lambda promedio en pruebas estáticas

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.



En el anexo L se detalla una tabla donde se encuentran los datos recolectados de las concentraciones de los gases de escape en pruebas estáticas, aquellos datos se muestran mediante gráficos de barras como se exponen en la ilustración 4-5, 4-6 y 4-7, las cuales se representaron anteriormente.

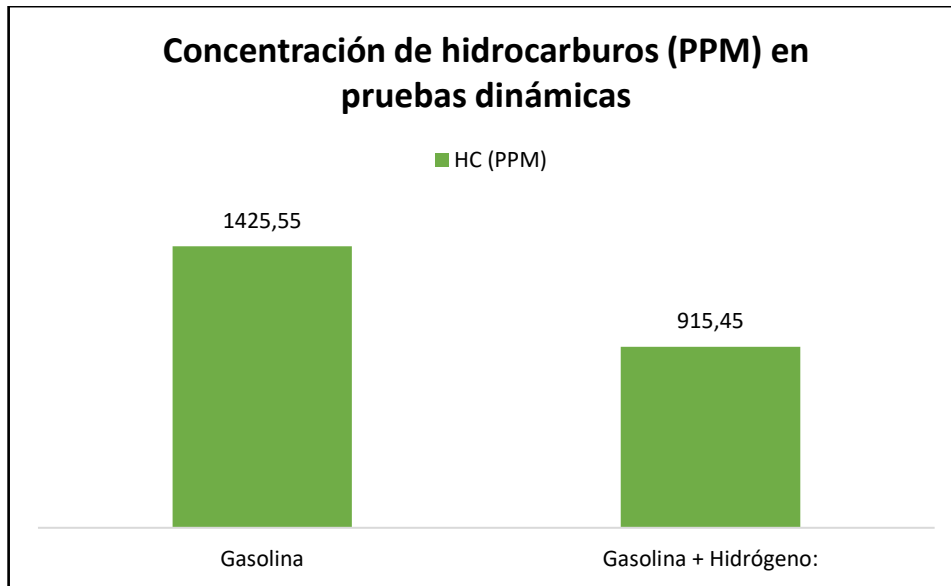
Por otro lado, los resultados de las pruebas dinámicas se diferencian con una leve reducción de algunos gases contaminantes con respecto a las pruebas estáticas. En la ilustración 4-8 se desarrolla una comparación promedio de las concentraciones porcentuales de CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>; en definitiva, se presentan reducciones de 0,73% de CO<sub>2</sub>, 2,00 de CO y un aumento de 1,67% de O<sub>2</sub>. Las pruebas dinámicas son las condiciones más reales a la que se somete el vehículo monoplaza, ya que se ejecuta en un ciclo de conducción como anteriormente se mencionó.



**Ilustración 4-8:** Porcentajes promedios de las concentraciones de gases emitidos en pruebas dinámicas

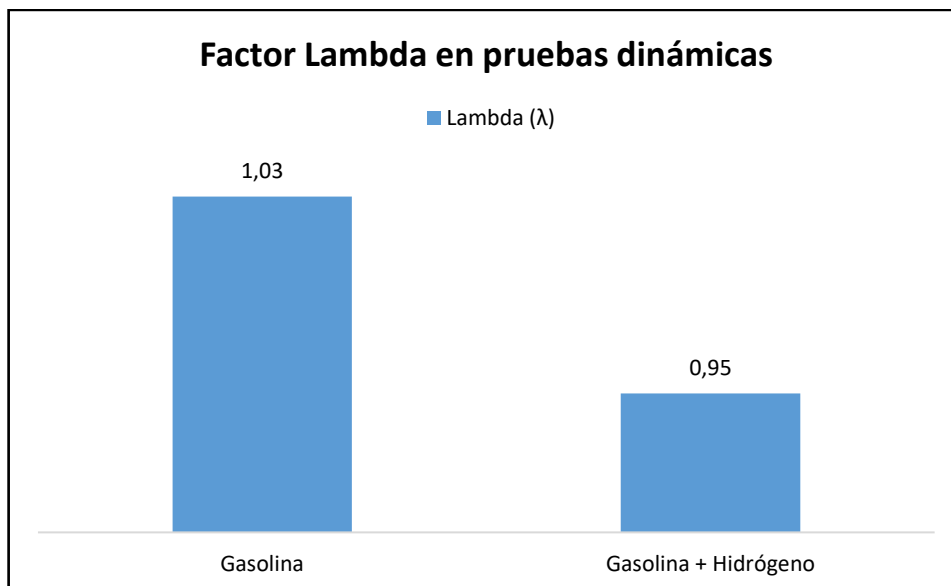
**Realizado por:** Cali D., Martillo G. 2023.

La ilustración 4-9 se describe la concentración de hidrocarburos no quemados, pero en pruebas dinámicas, la comparación se efectúa mediante una diferencia de los valores promedios en unidades de PPM, como resultado se obtiene una reducción 510,10 PPM, en relación con las anteriores pruebas estáticas, dicho valor indica una mayor disminución de este gas contaminante. Por otra parte, en la ilustración 4-10 detalla el factor lambda promedio en las pruebas dinámicas, cuando su alimentación es únicamente con gasolina es de 1,03 que indica una mezcla pobre en gasolina y 0,95 cuando se suministra una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina, que muestra que es una mezcla rica.



**Ilustración 4-9:** Promedio de partes por millón de hidrocarburos no quemados en pruebas dinámicas

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.



**Ilustración 4-10:** Factor lambda promedio en pruebas dinámicas

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En el anexo M se detalla una tabla donde se encuentran los datos recolectados de las concentraciones de los gases de escape en pruebas dinámicas, aquellos datos se muestran mediante diagramas de barras como se evidencia en la ilustración 4-8, 4-9 y 4-10, las cuales se representaron anteriormente.

En la tabla 4-8 se describe la variación de los porcentajes promedios de los gases emitidos por el vehículo monoplaza empleado para desarrollar este estudio considerando el porcentaje máximo

como el 100%, de tal forma para poder estimar su reducción en un valor porcentual. Además, el comportamiento de los datos recolectados es el siguiente: existe una reducción de CO<sub>2</sub>, CO e HC, además de un aumento del nivel de O<sub>2</sub>, mientras el factor lambda se mantiene con una leve variación; por esta razón, se describen con signos de mayor que (>) o menor que (<) para indicar un aumento o reducción respectivamente de dicho gas contaminante.

**Tabla 4-8:** Porcentajes de variación de emisiones con y sin la implementación del generador de hidrógeno

Tipos de pruebas	Concentraciones de las emisiones	Alimentación con gasolina		Alimentación con hidrógeno y gasolina		Porcentaje de variación (%)	
		800 - 900	2.000 – 2.500	800 - 900	2.000 – 2.500	800 - 900	2.000 – 2.500
	RPM						
Pruebas estáticas	CO <sub>2</sub> (%)	2,25	3,36	1,48	2,51	34,08 (<)	25,34 (<)
	CO (%)	3,21	4,61	2,52	4,15	21,34 (<)	10,13 (<)
	O <sub>2</sub> (%)	13,07	10,66	14,39	11,81	9,17 (>)	9,72 (>)
	HC (PPM)	737,85	454,40	611,35	383,15	17,14 (<)	15,68 (<)
	λ	0,95	0,95	0,96	0,95	0,00 (=)	0,01 (>)
Pruebas dinámicas	CO <sub>2</sub> (%)	4,22		3,50		17,18 (<)	
	CO (%)	9,09		7,08		22,04 (<)	
	O <sub>2</sub> (%)	6,34		8,01		20,83 (>)	
	HC (PPM)	1425,55		915,45		35,78 (<)	
	λ	1,03		0,95		7,38 (<)	

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Respecto a la normativa ecuatoriana INEN 2204, que presenta los límites máximos de contaminantes que un vehículo puede expulsar al medio ambiente, indica que para los resultados de las pruebas estáticas el valor de CO máximo es de 1% y de HC no puede superar las 200 PPM, lo cuales son obligatorios para vehículo fabricados después del año 2000. Igualmente es lo que sucede en la prueba dinámicas, donde el límite para vehículos de pasajeros livianos muestra un máximo de 3,40 gramos por milla de CO y 0,25 gramos por milla de HC para vehículos con 5 años de antigüedad. Se deduce que la razón por la cual no se alcanza con los límites de regulación de emisiones, se debe a la calidad del combustible que el Ecuador suministra en todo el país; además, la tecnología del vehículo monoplaza es antigua, ya que el sistema de alimentación es mediante un carburador de regulación simple, es decir, de tipo campana.

Según Baltazar (2020, p. 151) en los ensayos de las emisiones de gases de escape realizados en su proyecto, explica que mediante un analizador de gases JEVOL obtuvo una reducción de 11% de HC en comparación con el uso de únicamente con gasolina. En el presente proyecto se obtuvo un promedio aproximadamente de 16% de reducción de HC en las pruebas estáticas, no obstante, aquella reducción aumenta cerca del 36% de HC en pruebas dinámicas; se debe a que el hidrógeno

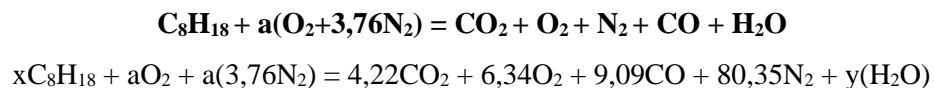
gaseoso permite una combustión más completa evitando la expulsión de restos particulados no quemados.

En la investigación de Borja, Borja y Castro (2014, pp. 79 -81) presenta los resultados obtenidos en su evaluación de gases contaminantes, pero en esta ocasión dichos valores son expresados en PPM, además se desarrollaron únicamente en pruebas estáticas. Luego de analizar el comportamiento de aquellos valores, tienen una similitud con la conducta de las concentraciones analizadas en el presente proyecto de investigación, dichos comportamientos son: la reducción del CO<sub>2</sub>, CO, HC y aumento del nivel de O<sub>2</sub>.

El trabajo de investigación de León (2019, pp. 33-35) se detalla una tabla con el resumen de los datos recolectados de las pruebas para evaluar las emisiones de gases de escape en un motor G16 Suzuki, los cuales indican una reducción de 51,98% de HC, 7,50% de CO y 63,90% de O<sub>2</sub>, además, posee un aumento de 3,60% de CO<sub>2</sub> y 0,49% de factor lambda. Con respecto al presente trabajo de investigación, el comportamiento sobre la variación de HC y CO es similar, en el resto de las variaciones sucede lo contrario a lo que representa León (2019, p. 35) en su investigación, los porcentajes de variación se encuentran explicados en la tabla 4-8.

#### **4.4.1. Relación entre aire, combustible e hidrógeno**

La estequiometría de la combustión de gasolina es una reacción química que expresa la cantidad exacta de aire y combustible, se emplea dicho concepto para hallar la proporción de aire y combustible en kilogramos, los cuales son los reactivos; por otra parte, mediante el análisis de gases de escape se obtiene los productos de la reacción, en la tabla 4-8 se muestran los valores promedios de los productos de los gases de escape de los dos tipos de sistemas de alimentación, los valores que son utilizados en la reacción estequiométrica pertenecen a las pruebas dinámicas, ya que se asemeja a las condiciones reales de conducción.



Primero se usan los valores promedios del sistema de alimentación únicamente con gasolina, lo siguiente es realizar un balance estequiométrico para encontrar las incógnitas de los reactivos y del agua para completar toda la reacción química, dicho proceso se justifica en la tabla 4-9.

**Tabla 4-9:** Balance estequiométrico con los productos del sistema de alimentación con gasolina

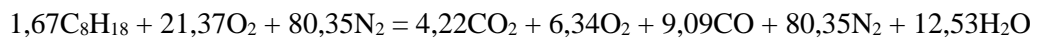
Balance	$x\text{C}_8\text{H}_{18}$	$a\text{O}_2$	$a(3,76\text{N}_2)$	=	$4,22\text{CO}_2$	$6,34\text{O}_2$	$9,09\text{CO}$	$80,35\text{N}_2$	$y(\text{H}_2\text{O})$
Nitrógeno	-	-	$a(3,76)$	=	-	-	-	80,35	-
Carbono	$8,00x$	-	-	=	4,22	-	9,09	-	-
Hidrógeno	$18,00x$	-	-	=	-	-	-	-	$2,00y$
Oxígeno	-	$a$	-	=	4,22	6,34	4,55	-	$y/2,00$

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Posteriormente, se forma una ecuación de cada elemento de los reactivos como el nitrógeno, carbono, hidrógeno y oxígeno, al igualar y despejar las incógnitas se obtienen los siguientes valores:

- $a = 21,37$
- $x = 1,67$
- $y = 12,53$

Cuando se reemplazan dichos valores de las incógnitas anteriormente descritas, se obtiene la siguiente reacción estequiométrica:



En la tabla 4-10 se muestran los coeficientes del balance de la reacción estequiométrica, que tanto del lado de los reactivos y productos el valor de los elementos químicos debe ser similar, lo siguiente es realizar un proporción en base al combustible mediante un división de 1,66 para cada coeficiente de la reacción química; el peso molecular es la suma de las masas atómicas de cada elemento de la fórmula molecular de aquella sustancia en unidades de gramos sobre moles (g/mol), para que en la masa total 1 se multipliquen los valores la “relación a un  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ” por el “peso molecular”, lo último de la tabla 4-10 es la comprobación del peso molecular de la reacción, el proceso consiste en sumar la masa total 1 de los reactivos y productos para obtener la masa total 2, dicha suma tiene un valor aproximado ya es el resultado de una reacción estequiométrica.

**Tabla 4-10:** Masa molecular total de los reactivos y productos del sistema de alimentación con gasolina

	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\text{O}_2$	$3,76\text{N}_2$	=	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2\text{O}$
<b>Coeficientes</b>	1,66	21,37	80,35	=	4,22	6,34	9,09	80,35	12,53
<b>Relación a un <math>\text{C}_8\text{H}_{18}</math></b>	1,00	12,84	48,29	=	2,54	3,81	5,46	48,29	7,53
<b>Masa molecular (g/mol)</b>	114,00	32,00	28,00	=	44,00	32,00	28,00	28,00	18,00

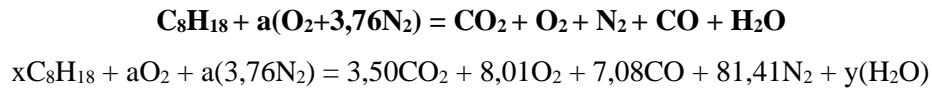
<b>Masa total 1 (g/mol)</b>	114,00	411,02	1.352,25	=	111,60	121,94	152,98	1.352,25	135,55
<b>Masa total 2 (g/mol)</b>	1.877,26			=	1.874,33				

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Finalmente, para obtener la masa real del aire se debe sumar el peso del oxígeno y nitrógeno de la masa total 1 que se muestra en la tabla 4-10, el resultado de la suma es de 1.763,26 kilogramos de aire real sin considerar la proporción de la relación a un porcentaje de combustible; de tal forma, para obtener la proporción de cuanto aire necesita por un kilogramo de combustible, se divide la masa de aire real para el peso molecular de la gasolina, dicha operación tiene como producto 15,47 kilogramo de aire por cada kilogramo de gasolina.

- **Masa de aire real** = 411,02 O<sub>2</sub> + 1.352,25 N<sub>2</sub> = 1,763,26 Kg.
- **Aire combustible** = 15,47 Kg de aire por cada Kg de combustible.

Por consiguiente, la segunda parte consta de realizar el mismo proceso del balance estequiométrico, pero en esta ocasión se emplean los valores promedios del sistema de alimentación con una mezcla de gasolina e hidrógeno gaseoso de la tabla 4-8, dicho procedimiento del despeje de los coeficientes de los reactivos se muestra en la tabla 4-11.



**Tabla 4-11:** Balance estequiométrico con los productos del sistema de alimentación con una mezcla gasolina e hidrógeno

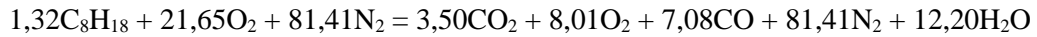
<b>Balance</b>	<b>xC<sub>8</sub>H<sub>18</sub></b>	<b>aO<sub>2</sub></b>	<b>a(3,76N<sub>2</sub>)</b>	<b>=</b>	<b>3,50CO<sub>2</sub></b>	<b>8,01O<sub>2</sub></b>	<b>7,08CO</b>	<b>81,41N<sub>2</sub></b>	<b>y(H<sub>2</sub>O)</b>
<b>Nitrógeno</b>	-	-	a3,76	=	-	-	-	81,41	-
<b>Carbono</b>	8,00x	-	-	=	3,50	-	7,08	-	-
<b>Hidrógeno</b>	18,00x	-	-	=	-	-	-	-	2,00y
<b>Oxígeno</b>	-	a	-	=	3,50	8,01	3,54	-	y/2,00

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

Una vez que se hallan formado y despejado las ecuaciones de cada elemento químico de los reactivos, se obtienen los siguientes resultados:

- **a** = 21,65
- **x** = 1,32
- **y** = 13,20

Por lo tanto, se reemplazan los valores en la reacción estequiométrica principal, y posteriormente obtener la masa molecular total de las fórmulas químicas de la reacción como se muestra en la tabla 4-12.



**Tabla 4-12:** Masa molecular total de los reactivos y productos del sistema de alimentación con una mezcla gasolina e hidrógeno

	<b>C<sub>8</sub>H<sub>18</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>3,76N<sub>2</sub></b>	=	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
<b>Coefficientes</b>	1,32	21,65	81,41	=	3,50	8,01	7,08	81,41	12,20
<b>Relación a un C<sub>8</sub>H<sub>18</sub></b>	1,00	16,37	61,56	=	2,65	6,06	5,35	61,56	9,98
<b>Masa molecular (g/mol)</b>	114,00	32,00	28,00	=	44,00	32,00	28,00	28,00	18,00
<b>Masa total 1 (g/mol)</b>	114,00	523,89	1.723,61	=	116,45	193,81	149,89	1.723,61	179,70
<b>Masa total 2 (g/mol)</b>	2.361,51			=	2.363,48				

Realizado por: Cali D., Martillo G. 2023.

En definitiva, se obtiene 2.247,51 kilogramos de la mezcla de aire e hidrógeno real sin considerar la proporción de la relación de un porcentaje de gasolina, y al realizar la división de aquel resultado con la masa molecular de la gasolina, se consigue 19,71 kilogramos de aire por cada kilogramos de combustible; no obstante, se precisa conocer cuanto hidrógeno gaseoso se combustiona en el interior del motor, para ello se realiza un resta de las masas de aire de los dos tipos de alimentación, que tiene como resultado 4,25 kilogramos de hidrógeno gaseoso por cada kilogramos de combustible. Además, se debe tener en cuenta la relación de aire combustible que indica la ficha técnica de la motocicleta, la cual es de 9 partes de aire por 1 de combustible.

- **Masa aire-hidrógeno real** = 523,89 O<sub>2</sub> + 1.723,61 N<sub>2</sub> = 2.247,51 Kg.
- **Aire-hidrógeno combustible** = 19,71 Kg de aire por cada Kg de combustible y 4,25 Kg de hidrógeno por un Kg de combustible.

## CAPÍTULO V

### 5. MARCO PROPOSITIVO

En el presente capítulo se plantean algunas propuestas o futuras líneas de investigación que se derivan de este proyecto. Como toda investigación que contribuye a despejar incógnitas sobre el tema que presenta, también genera nuevas interrogantes, ideas y otras aplicaciones del trabajo, es decir, que en este apartado se presentan otras líneas de investigación para el estudio tenga una mayor comprensión en todos los posibles campos en la que se encuentra vinculada. Las limitaciones del proyecto de investigación tienen una gran influencia sobre los objetivos planteados, por ende, si el alcance es modificado o alterado, existe la posibilidad de otra línea de trabajo que consistirá en desarrollar los nuevos objetivos planteados, al mismo tiempo puede ser interesante desarrollar nuevas campañas experimentales y cálculos teóricos que validen la experimentación del estudio.

#### 5.1. Propuesta

Una de las líneas de investigación más notable es realizar un análisis químico de la combustión dentro del motor, dicha combustión sucede relativamente rápida en el cilindro del motor, la cual consiste en la unión de un combustible con el oxígeno que desprende calor, existen varios grados de combustión, desde un lenta a una muy rápida. Al realizar un análisis de la combustión con hidrógeno como combustible adicional se podría demostrar el ahorro de combustible y la reducción de gases de escape, ya que es esencial que los elementos a combustionar posean una gran afinidad con el oxígeno, tal como el carbono e hidrógeno. Todo aquello se consigue mediante relaciones estequiométricas, las cuales tienen como reactivos el combustible a quemar y el aire, como resultado se obtienen los denominados productos de combustión, estos dependen de los siguientes factores: tipo de combustible, relación de aire-combustible, estado del motor y condiciones ambientales; normalmente los productos de la combustión contienen dióxidos de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, óxidos de nitrógeno, vapor de agua, dióxido de sulfuro, cenizas e hidrocarburos. Finalmente se podría realizar una comparación entre los productos de la combustión obtenidos mediante relaciones estequiométricas y los datos recolectados con un analizador de gases, por consiguiente, se validaría la campaña experimentación por aquel análisis químico.

Otra línea de investigación es determinar la mejor mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina mediante el suministro del combustible suplementario directamente en el cilindro del motor,



investigar y experimentar si la producción de hidrógeno es suficiente para mejorar los atributos de potencia, torque, consumo de combustible y emisión de gases. En algunas investigaciones detallan que el hidrógeno es inyectado a las cámaras de combustión, pero para ello se necesita de un mejor control de la admisión de dicho combustible, el cual puede ser mediante actuadores controlados electrónicamente por una computadora, además, se debe tener en cuenta la cantidad de aire idónea para este nuevo sistema de inyección electrónica.

Implementar un generador de hidrógeno con una mayor tecnología es una línea de investigación muy interesante, ya que existen sistemas que son capaces de generar una mayor producción de hidrógeno y su vez separar los dos gases que se desprenden de sus polos, como tal el negativo separa hidrógeno, mientras que el positivo separa el oxígeno del agua. Además, otra consideración para un generador de mayor producción energética es la cantidad de voltaje que este necesitará, por lo cual se debe realizar un estudio para que el vehículo pueda proporcionar un mayor voltaje que el nominal, este oscila entre 12 voltios (motocicletas) a 24 voltios (vehículos de un mayor tamaño), por consiguiente, se tendría que analizar si el flujo másico de hidrógeno no causará riesgo a los ocupantes y vehículo, ya que es un gas muy volátil e inflamable.

Finalmente, la línea de investigación más compleja es almacenar hidrógeno gaseoso en un tanque para posteriormente ser usado en un vehículo como fuente principal de energía, para ello se debe realizar un estudio detallado sobre las características que el tanque debe tener para que este sea seguro al momento de almacenar y transportar hidrógeno gaseoso, además, de conocer un proceso viable para comprimir este gas debido a su alto grado de inflamabilidad, ya que al suministrar hidrógeno a alta presión este puede que su temperatura aumente y genera una autoignición no controlada. Posteriormente, se necesita investigar y experimentar una forma segura de suministrar el hidrógeno desde un compartimento de alimentación hasta las cámaras de combustión del motor, también se debe indagar el tipo de sistema de inyección para que el hidrógeno pueda quemarse directamente en el interior del cilindro.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la factibilidad del hidrógeno como combustible suplementario en un motor de combustión interna a través de un análisis en base a su implementación, rendimiento del motor, consumo de combustible y emisión de gases. Los estudios necesarios para evidenciar la veracidad de la funcionalidad del dispositivo generador de hidrógeno y obtener resultados idóneos. En secuencia de los resultados expuestos sobre la implementación del generador de hidrógeno y posteriores pruebas de funcionamiento, se detallan las siguientes conclusiones:

El dispositivo generador de hidrógeno basa su funcionamiento en la electrolisis en donde el agua es la sustancia para electrolizar, mediante dos electrodos los cuales son conductores del polo positivo y polo negativo conectado a la fuente de la batería. Dicho dispositivo tiene una dimensión de 21cm de alto por 7cm de ancho ubicado en el chasis debajo del tanque de combustible del vehículo monoplaza, espacio adecuado para realizar su mantenimiento y adaptación al motor de combustión interna sin obstaculizar su funcionamiento o impedir al conductor maniobrar el vehículo monoplaza, cabe recalcar que el sistema generador de hidrógeno fue adquirido en el mercado con un valor aproximado de entre 120 a 200 dólares.

Se realizó pruebas de rendimiento del motor de combustión interna mediante un dinamómetro de rodillos de la marca Motorroll, en los ensayos realizados con un sistema de alimentación a gasolina se evidencia una potencia máxima del motor de 9,7HP a 4.076RPM con un torque máximo de 14,69 Nm a 2.963 RPM, no obstante, según la ficha técnica del vehículo monoplaza (no cuenta con datos acerca del torque) esta cuenta con 12HP a 7.000 RPM de potencia máxima, por lo que tiene una disminución real de 2,3 HP potencia. Al realizar las pruebas con una mezcla de gasolina e hidrógeno gaseoso presenta una potencia máxima del motor de 8,1 HP a 3.950 RPM con un torque máximo de 16,91 Nm a 3.103 RPM, con respecto al anterior ensayo a gasolina, se tiene una disminución de 1,6 HP de potencia y 3,01 Nm de torque. En investigaciones previas de otros autores acerca de la implementación de hidrógeno en motores de combustión interna, los cuales manifiestan una reducción de potencia en las pruebas de rendimiento del motor sin evidenciar ni justificar su conclusión.

El consumo de combustible se lo determinó mediante un envase graduado a partir del ciclo de conducción en la ciudad de Riobamba, se realizó una serie de pruebas para obtener un promedio de datos con el fin de reducir el margen de error. La ficha técnica del vehículo monoplaza presenta un rendimiento de 150 kilómetros por galón sin embargo, mediante pruebas de consumo usando únicamente gasolina obtenemos un rendimiento actual de 75,63 kilómetros por galón sabiendo

que el vehículo pertenece al año 2017 teniendo un cierto desgaste de su vida útil a través del tiempo y usando una mezcla de gas de hidrógeno con gasolina obtenemos un rendimiento de 91,10 kilómetros por galón, dando como resultado un incremento del 15,47 km/gal al implementar el generador de hidrógeno, es decir que tiene un ahorro de combustible del 14,13%. En el trabajo de investigación de Borja, Borja y Castro (2014, pp.83-84) presentan un ahorro de combustible en porcentajes del 11% en vehículo FIAT Fiorino.

El porcentaje de emisiones producidas por el vehículo monoplaza se lo realizó con ayuda de un analizador de gases en conjunto con un tacómetro digital en condiciones estáticas y dinámicas, esta última prueba se llevado a cabo en el trayecto de ciclo de conducción urbano. El promedio de gases producidos en condiciones estáticas evidencia una disminución usando una mezcla de gasolina con hidrógeno gaseoso en comparación al uso de únicamente gasolina con un factor lambda que varía entre 0,95 – 0,96 (mezcla rica). La reducción de los gases contaminantes en pruebas estáticas se resume de la siguiente manera entre un rango de 800 a 900 rpm y 2.000 a 2.500 rpm respectivamente:

- CO<sub>2</sub>: 0,77% y 0,85%.
- CO: 0,68% y 0,47%.
- O<sub>2</sub>: a excepción de este gas que aumenta 1,32% y 0,47%.
- HC: 126,50 PPM y 71,25 PPM.

En condiciones dinámicas el promedio de gases emitidos en el ciclo de conducción urbano presenta una leve disminución del 0,73% de CO<sub>2</sub>, 2,00 de CO, 510,10 PPM y un aumento de 1,67% de O<sub>2</sub>, al emplear una mezcla de hidrógeno gaseoso con gasolina se presenta un factor lambda de 0,95 (mezcla rica) en comparación al uso de únicamente gasolina con un factor lambda de 1,03 (mezcla pobre).

Finalmente, se analiza que la implementación del generador de hidrógeno reduce significativamente la potencia y torque del vehículo considerando su cilindraje, pero si reduce levemente el consumo de combustible y emisión de gases. En comparación a lo que describen los fabricantes del generador de hidrógeno, donde explican sin datos o algún tipo de justificación que este sistema es capaz de mejorar la potencia del motor, reducir el consumo de combustible entre un rango de 20% a 40% y así mismo describen que es capaz de reducir un 80% de los gases contaminantes producto de la combustión, por esta razón, mediante este estudio se confirmó que aquellas descripciones no son válidas. Por otra parte, en el ámbito económico para poder cubrir el costo del generador con respecto al ahorro de combustible anual de 36,21 dólares, se tendría que usar el sistema generador de hidrógeno aproximadamente 5 años, considerando un precio de

180 dólares incluido los costos de la adaptación como la sustitución de la batería en el caso de que se encuentre en mal estado.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda tener conocimiento de las características y funcionamiento de un dispositivo generador de hidrógeno, así como del vehículo monoplace a realizar la adaptación con el fin de escoger de mejor manera el equipo idóneo para su experimentación, tener el debido cuidado al maniobrar con las herramientas durante su instalación y colocar el dispositivo en un espacio de fácil acceso sin interferir en la movilidad del vehículo ni la del conductor evitando de esa forma accidentes.

Es recomendable para las pruebas de rendimiento del motor elegir la empresa que proporcione un banco de rodillos adecuado para vehículos monoplace, previo a la ejecución de los ensayos se debe enlazar y sujetar la motocicleta a los rodillos del dinamómetro, usar los implementos de seguridad y seguir las instrucciones del especialista encargado del instrumento, esto para cada caso de estudio. Es necesario deducir las curvas de torque y potencia obtenidas por el dinamómetro de rodillos con la finalidad de explicar el porqué de cada valor producido.

Se recomienda realizar las pruebas de consumo de combustible mediante un dispositivo electrónico que muestre la ruta del ciclo de conducción a seguir, además de un depósito graduado que posea mayor precisión volumétrica para registrar el combustible sobrante en una base de datos, esto se ejecutó tanto para la prueba usando solo gasolina como una mezcla de gasolina con gas de hidrógeno; por esta parte, para un mayor análisis del consumo de combustible se recomienda utilizar un instrumento con mayor precisión como un medidor de combustible digital. Dicha ruta del ciclo de conducción tiene un trayecto de 13,30 km aproximadamente, recorrido realizado con combustible extra para cada prueba y para su cálculo del saldo ahorrado se tomó el precio del combustible establecido en el mercado ecuatoriano, por lo cual cambiar por un combustible de mayor calidad, se obtendría una mejora en todos los resultados de las pruebas de funcionamiento, a excepción del precio, pues este aumentaría drásticamente.

Así mismo, se debe tomar en cuenta la siguiente recomendación para determinar la emisión de gases producto de combustión para una mezcla de gas de hidrógeno con gasolina y solamente gasolina, la cual es usar un analizador de gases con mayor tecnología para las pruebas estáticas y dinámicas, cada una llevando un registro en una base de datos de manera computarizada, donde se registren dichos datos de manera constante hasta que termine el ensayo, además, de evidenciar el porcentaje de emisión de los compuestos químicos en cada prueba realizada.

## BIBLIOGRAFÍA

**AEADE**, *AEADE* – Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. [en línea]. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://www.aeade.net/>.

**AGUIRRE, O.**, *Celdas de Hidrógeno y su Potencial de Aplicación* [en línea]. Xalapa-Enríquez: Universidad VERACRUZANA. [Consulta: 29 octubre 2022]. Disponible en: <https://docplayer.es/6815151-Universidad-veracruzana-facultad-de-ingenieria-mecanica-electrica-celdas-de-hidrogeno-y-su-potencial-de-aplicacion-monografia.html>.

**ASENSIO, P.**, Hidrógeno y pila de combustible. *Energías Renovables* [en línea], pp. 1-20. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/publicacion/hidrogeno-y-pila-de-combustible-2007/>.

**BALTAZAR, P.**, Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo. S.l.:

**BORJA, W., BORJA, A. & CASTRO, D.**, *Potenciación de un motor a gasolina por medio de un generador de hidrógeno* [en línea]. Quito: Universidad de San Francisco de Quito. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2561>.

**CALVA, R. & FLORES, A.**, Obtención del ciclo de conducción urbano para la ciudad de Riobamba en horas pico y no pico mediante la recolección de datos de los factores de operación y consumo energético obtenido por un dispositivo OBD II. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* [en línea], pp. 1-64. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13823>.

**CANDO, H. & QUELAL, H.**, *Construcción y adaptación de un sistema generador de gas de hidrógeno para suministrarlo a un motor de combustión interna* [en línea]. Ibarra: Universidad Técnica del Norte. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/1321>.

**CARBON BRIEF**, Cambio climático: los 5 países que más han contribuido históricamente al calentamiento global - BBC News Mundo. *BBC* [en línea]. [Consulta: 5 noviembre 2022]. Disponible en: [https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-59074490?at\\_medium=custom7&at\\_custom1=%5Bpost+type%5D&at\\_custom2=facebook\\_pa](https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-59074490?at_medium=custom7&at_custom1=%5Bpost+type%5D&at_custom2=facebook_pa)

ge&at\_custom4=BED1E4EC-380E-11EC-B3BA-5E890EDC252D&at\_campaign=64&at\_custom3=BBC+News+Mundo&fbclid=IwAR05LGojx\_oa8y\_cv9fJsIosJ4Ls3uokCLvQej7ui4r8u33J6uvKnApe8ok.

**ÇENGEL, A. Y. & BOLES, M. A.,** *Termodinámica 5ta edición*. S.l.: s.n.

**COPA, D.,** *Economía del hidrógeno hasta 2030* [en línea]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. [Consulta: 29 octubre 2022]. Disponible en: <https://oa.upm.es/62906/>.

**DE TROYA, J., CARRAL, L., ÁLVAREZ, C. & RODRÍGUEZ, J.,** ESTUDIO COMPARATIVO DEL USO DE HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES FÓSILES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN BUQUES. *Universidad de La Coruña* [en línea], pp. 1-23. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: [https://www.udc.es/export/sites/udc/gem/\\_galeria\\_down/congresos/Copinaval\\_2011\\_103\\_-\\_USO\\_DE\\_HIDRxGENO\\_de\\_Troya\\_Calatayud\\_y\\_otros\\_.pdf\\_2063069294.pdf](https://www.udc.es/export/sites/udc/gem/_galeria_down/congresos/Copinaval_2011_103_-_USO_DE_HIDRxGENO_de_Troya_Calatayud_y_otros_.pdf_2063069294.pdf).

**FÀBREGA, M.,** *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna* [en línea]. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6533>.

**FAMILIAR, C.,** *Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales* [en línea]. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13713>.

**FERNÁNDEZ, R.,** Evolución de la población mundial hasta 2050 | Statista. *Statista* [en línea]. [Consulta: 5 noviembre 2022]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/635122/evolucion-de-la-poblacion-mundial/>.

**GALLEGOS, P.,** Manual - El calibrado o pie de rey. *Metrología dimensional* [en línea], pp. 1-30. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://en.calameo.com/books/000876473ff21c1bfd361>.

**GIZ FICHTNER,** Hidrógeno - cadenas de valor y legislación internacional. *FICHTNER* [en línea], no. Primera edición digital, pp. 1-111. [Consulta: 12 noviembre 2022]. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/12/Cadena-de-valor-H2-y-regulacion-internacional.pdf>.

**GLOBALTECH**, Analizador de gases portátil Kane auto plus. *Equipos automotrices* [en línea]. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://globaltech-car.com/producto/analizador-de-gases-portatil-kane-autoplus-4-2/>.

**GOOGLE MAPS**, Ruta del ciclo de conducción. [en línea]. [Consulta: 20 diciembre 2022]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/dir/Cajero+Autom%C3%A1tico+-Bancomatico,+88QF%2BG38,+Riobamba/Parque+Maldonado/-1.655084,-78.6451299/-1.6611864,-78.6773394/@-1.6638969,-78.7312753,12z/data=!3m1!4b1!4m18!4m17!1m5!1m1!1s0x91d307eae771e4d1:0xa0d9bf243192d6ae!2m2!1d-78.6772957!2d-1.6612002!1m5!1m1!1s0x91d3a82f9debccfb:0xf35a2c3d1ddb78f0!2m2!1d-78.6482957!2d-1.6727123!1m1!4e1!1m1!4e1!3e9>.

**GTC**, TA100 Smartach+ Digital Tachometer - General Technologies Corp. *Productos* [en línea]. [Consulta: 14 enero 2023]. Disponible en: <https://gtc.ca/product/ta100-smartach-wireless-ignition-analyzer-and-tachometer/>.

**HIDALGO, G. & LEÓN, J.**, Anuario de Estadísticas de Transporte (ANET) 2020. [en línea]. Quito: [Consulta: 5 noviembre 2022]. Disponible en: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2020/2020\\_ANET\\_METODOLOG%C3%8DA.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2020/2020_ANET_METODOLOG%C3%8DA.pdf).

**INEN**, Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina. *Instituto Ecuatoriano de Normalización* [en línea], vol. Segunda, no. Revisión, pp. 1-8. [Consulta: 28 enero 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_2204-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2204-2.pdf).

**KANE**, Manual de usuario: Analizador de gases de automotrices - Kane. *ANSED Diagnostic solution* [en línea], pp. 1-44. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://manualzz.com/doc/64037387/kane-autoplus-serie-manual-de-usuario>.

**LEÓN, J.**, *Implementación de un sistema generador de hidrógeno en un motor carburado* [en línea]. Quito: Universidad San Francisco de Quito. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8319>.



**MOTORROLL**, Bancos de Prueba Motorroll - Tracción en las cuatro ruedas. *Banco de prueba mixtos* [en línea]. [Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/493178560/Bancos-de-Prueba-Motorroll>.

**PERETTI, H. A. & VISINTIN, A.**, Hidrógeno, combustible del futuro: ¿POR QUÉ, ¿CÓMO Y DÓNDE? *INIFTA* [en línea], vol. Energía Atómica, pp. 1-9. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <http://a.ns.inifta.unlp.edu.ar/extension/Hidrógeno.pdf>.

**PESANTES, V., ORTEGA, C., RUBIO, J. & REYES, G.**, Análisis de las normativas locales e internacionales en control de emisiones contaminantes en el DMQ. *Dominio de las Ciencias* [en línea], vol. 7, no. 5, pp. 971. [Consulta: 28 enero 2023]. ISSN 2477-8818. DOI 10.23857/dc.v7i5.2293. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8383822&info=resumen&idioma=SPA>.

**POSSO, F. & SÁNCHEZ, J.**, La Economía del Hidrógeno en el Ecuador: oportunidades y barreras. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* [en línea], vol. 6, no. 2, pp. 46-62. [Consulta: 12 noviembre 2022]. ISSN 2528-7788. DOI 10.18272/ACI.V6I2.187. Disponible en: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/187>.

**PREGO, C.**, Toyota y Yamaha están desarrollando un motor V8 de hidrógeno. Su objetivo: salvar la combustión interna. *Xataka* [en línea]. [Consulta: 26 diciembre 2022]. Disponible en: <https://www.xataka.com/vehiculos/toyota-yamaha-estan-desarrollando-motor-v8-hidrogeno-su-objetivo-salvar-combustion-interna>.

**RAMOS, L.**, Motor rotativo Wankel. *Coches.com* [en línea]. [Consulta: 26 diciembre 2022]. Disponible en: <https://noticias.coches.com/noticias-motor/hasta-luego-motor-rotativo-wankel/53462>.

**RICÓN, X.**, *Estudio sobre la aplicación de hidrógeno como combustible alternativo a bordo de buques* [en línea]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23353>.

**ROSAS, Á. y BARONA, G.**, Elaboración de un manual de mantenimiento para el dinamómetro de chasis Ips 3000, instalado en el centro de transferencia tecnológica para la capacitación e investigación en control de emisiones vehiculares (CCICEV). *Escuela Politécnica Nacional*, pp. 1-190.

**SÁINZ, D.**, *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de automoción* [en línea]. Navarra: Universidad Pública de Navarra. [Consulta: 28 octubre 2022]. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/20048>.

**S&P, 2020.** Velocidad del aire. *Sistemas de Ventilación SLU - Solerpalau* [en línea]. [Consulta: 15 enero 2023]. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>.

**TESTO SE & CO. KGAA,** Manual de instrucciones de Analizador de productos de la combustión - testo 340. *Testo-Straße 1*, pp. 1-62.

**TOTAL HOME,** Moto tundra td 150-aa bronco. [en línea]. [Consulta: 20 diciembre 2022]. Disponible en: <https://totalhome.ec/shop/motos/moto-tundra-td150-aa-bronco-deluxe-negro/>.

## ANEXOS

### ANEXO A: LISTA DE MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO MONOPLAZA ANTES DE REALIZAR LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Actividades de mantenimiento	Hecho
ABC del motor	✓
Reemplazo de bobinas y bujía	✓
Cambio del filtro de aire y sistema de admisión de aire	✓
Sustitución de elementos desgastados del carburador	✓
Reemplazo del cable de aceleración	✓
Sustitución de retrovisores	✓
Cambio de la llanta delantera y posterior	✓
Cambio de aceite	✓
Lubricación de los rodamientos de las ruedas	✓
Limpieza del tanque de combustible	✓
Reemplazo de la batería	✓

### ANEXO B: PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO MONOPLAZA



**ANEXO C: INTENSIDAD (AMPERIO) DEL CONSUMO ELÉCTRICO APROXIMADO DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO**



**ANEXO D: VOLTAJE (VOLTEO) DEL CONSUMO ELÉCTRICO CON EL ANTIGUO REGULADOR DE VOLTAJE**

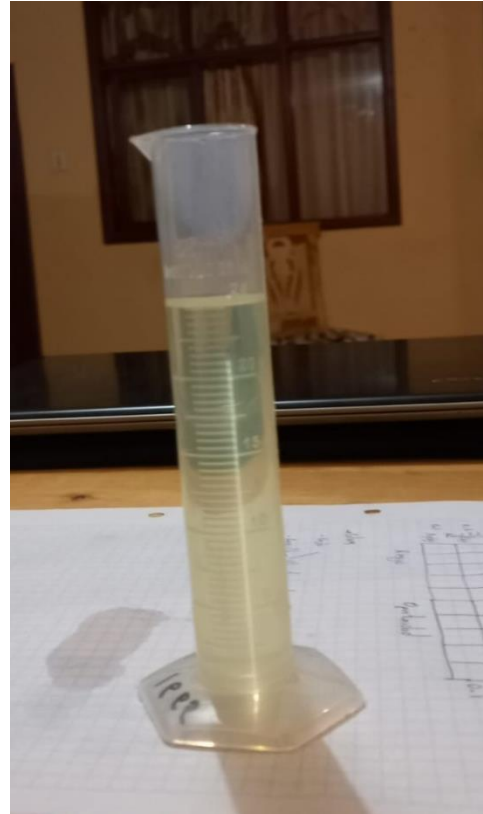




**ANEXO E: BANCO DE PRUEBAS DE RODILLO MIXTOS DE LA MARCA MOTOROLL  
USADO PARA LAS PRUEBAS DE POTENCIA Y TORQUE**



**ANEXO F: USO DE LOS ELEMENTOS DE MEDICIÓN EN LAS PRUEBAS PARA EVALUAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE**



**ANEXO G: PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE SIGUIENDO UN CICLO DE CONDUCCIÓN EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA**





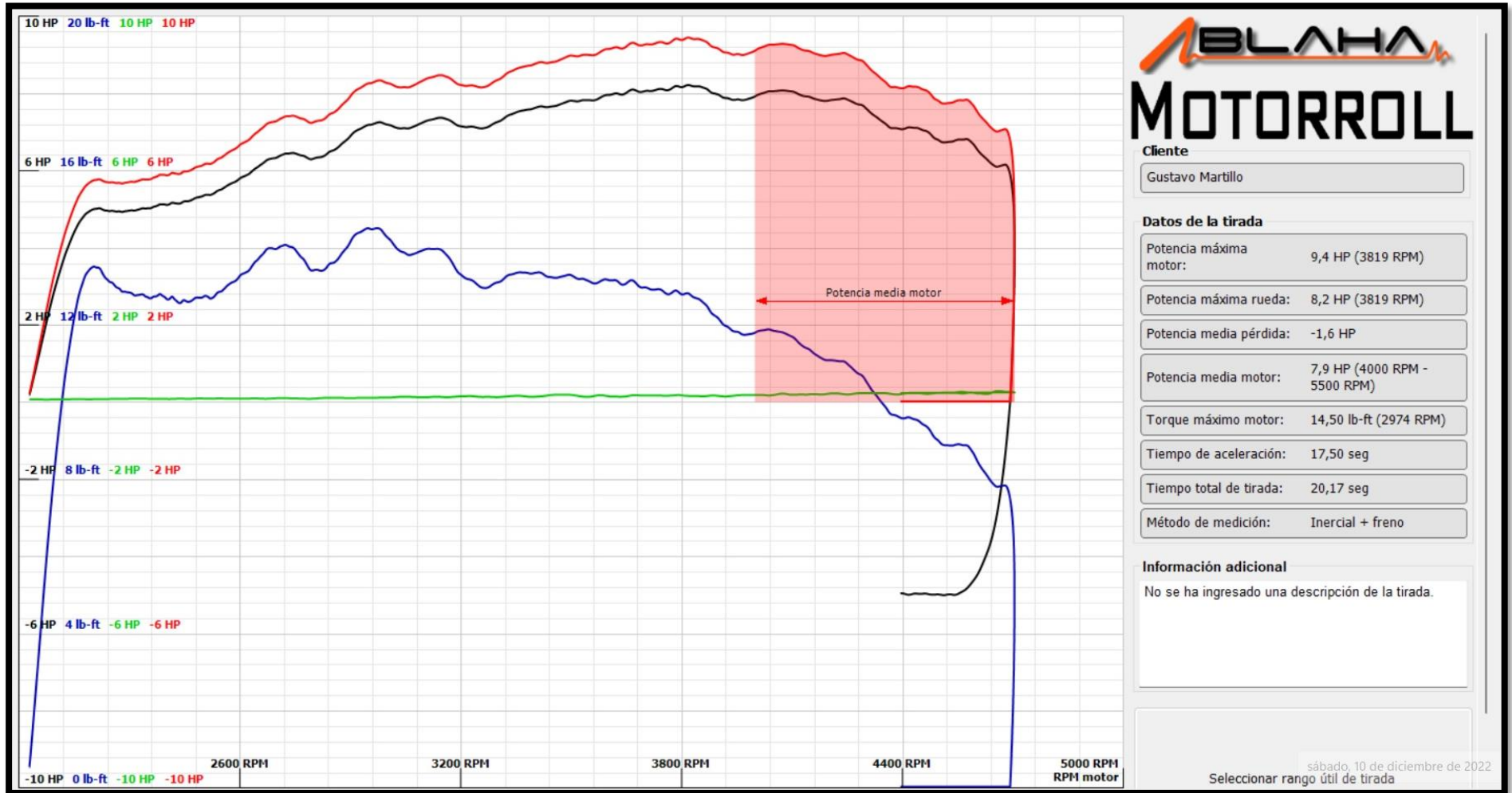
**ANEXO H: MEDICIÓN DE LAS REVOLUCIONES POR MINUTO EN LAS PRUEBAS ESTÁTICAS PARA EVALUAR LA CONCENTRACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE**



**ANEXO I: IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO EN UNA MOTOCICLETA**

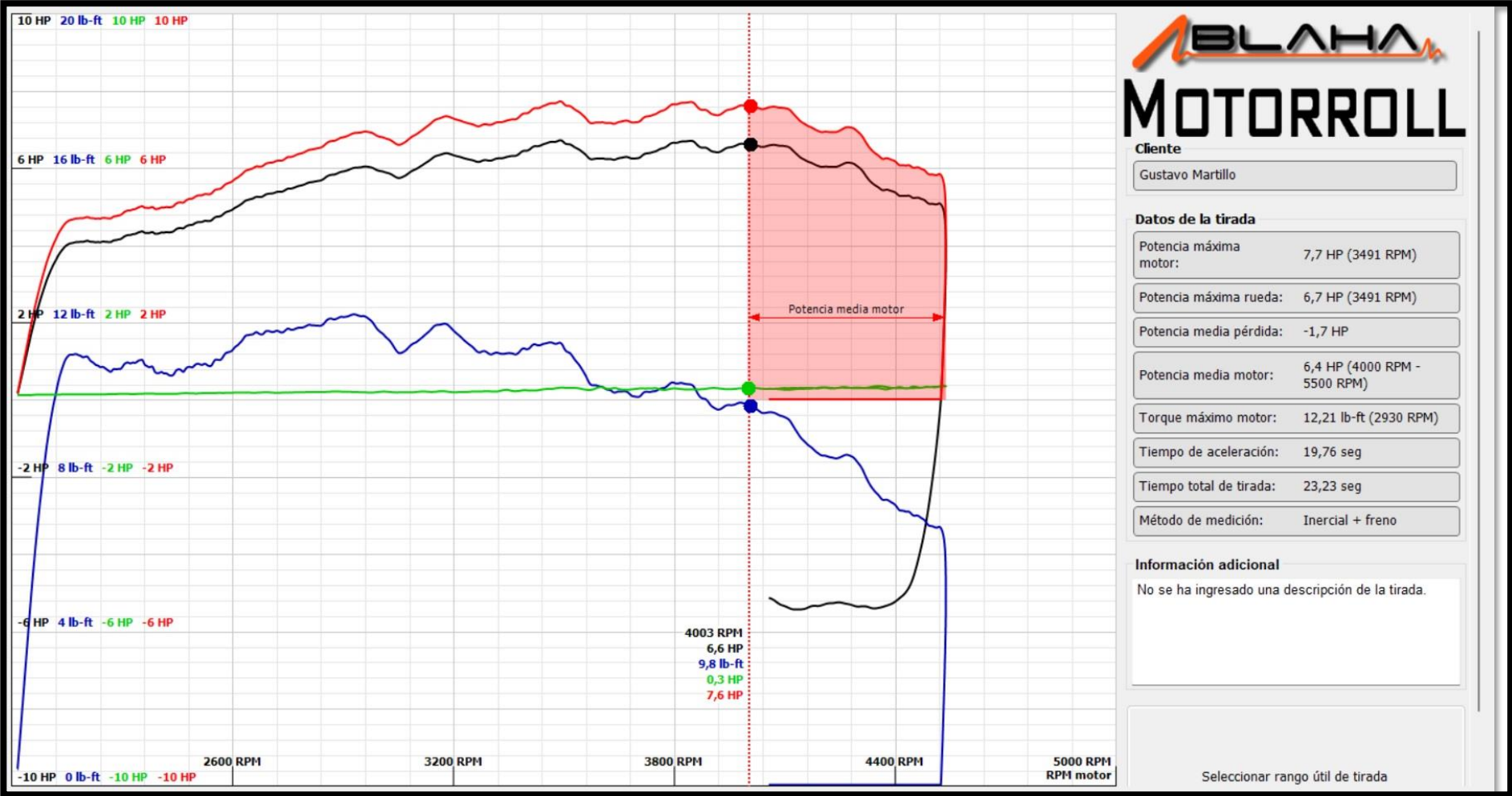


ANEXO J: CURVAS MÍNIMAS DE POTENCIA Y TORQUE DEL VEHÍCULO ALIMENTADO CON GASOLINA





**ANEXO K: CURVAS MÍNIMAS DE POTENCIA Y TORQUE DEL VEHÍCULO ALIMENTADO CON UNA MEZCLA DE HIDRÓGENO GASEOSO Y GASOLINA**



**Ciente**  
Gustavo Martillo

**Datos de la tirada**

Potencia máxima motor:	7,7 HP (3491 RPM)
Potencia máxima rueda:	6,7 HP (3491 RPM)
Potencia media pérdida:	-1,7 HP
Potencia media motor:	6,4 HP (4000 RPM - 5500 RPM)
Torque máximo motor:	12,21 lb-ft (2930 RPM)
Tiempo de aceleración:	19,76 seg
Tiempo total de tirada:	23,23 seg
Método de medición:	Inercial + freno

**Información adicional**  
No se ha ingresado una descripción de la tirada.

Seleccionar rango útil de tirada



<b>RPM: 2.000 - 2.500</b>																				
CO2 (%)	2,40	2,60	2,50	2,50	2,50	2,60	2,60	2,40	2,50	2,50	2,60	2,60	2,50	2,50	2,60	2,40	2,50	2,50	2,40	2,40
CO (%)	4,12	4,12	4,09	4,13	4,02	4,11	4,17	4,20	4,33	4,14	4,15	4,18	4,15	4,18	4,10	4,08	4,14	4,20	4,17	4,16
O2 (%)	12,43	11,71	12,04	11,91	11,92	12,10	12,34	11,80	11,18	12,21	11,84	12,05	11,57	11,41	11,73	11,98	11,43	11,36	11,65	11,51
HC (ppm)	384,00	383,00	384,00	386,00	388,00	389,00	389,00	389,00	390,00	389,00	374,00	373,00	375,00	398,00	373,00	381,00	376,00	385,00	380,00	377,00
Lambda	0,96	0,98	0,96	0,96	0,97	0,94	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96

**ANEXO M: CONCENTRACIÓN DE GASES DE ESCAPE EN PRUEBAS DINÁMICAS**

<b>GASOLINA</b>																				
CO2 (%)	4,10	4,30	4,50	4,80	4,60	4,50	4,40	4,00	3,80	3,70	3,90	3,80	4,10	4,30	4,40	4,60	4,50	3,50	4,40	4,20
CO (%)	8,74	9,76	8,90	8,68	9,54	9,69	8,42	9,29	9,52	9,15	9,09	8,90	8,65	9,23	8,46	8,95	9,32	9,54	8,78	9,13
O2 (%)	6,25	5,52	5,52	5,55	5,97	6,18	6,85	6,97	6,50	6,48	7,09	5,95	5,78	6,46	6,88	6,91	6,34	6,13	6,56	6,89
HC (ppm)	1586,00	1746,00	1285,00	951,00	903,00	835,00	1050,00	1854,00	1698,00	2023,00	1599,00	1213,00	1257,00	1563,00	1488,00	1347,00	1489,00	1647,00	1592,00	1385,00
Lambda	0,94	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,02	0,98	1,08	1,27	1,19	1,06	1,21	1,04	0,96	0,96	0,98	1,05	1,10	0,98
<b>HIDRÓGENO</b>																				
CO2 (%)	3,50	3,60	3,60	3,60	3,80	3,50	3,30	3,50	3,40	3,40	3,60	3,60	3,40	3,40	3,50	3,30	3,40	3,60	3,50	3,40
CO (%)	7,61	7,62	7,70	7,78	7,88	7,68	7,77	7,99	6,32	6,20	5,89	6,63	6,45	7,13	7,25	6,98	6,75	6,43	6,66	6,96
O2 (%)	7,51	7,10	9,24	9,66	7,37	7,64	8,36	7,43	7,68	7,69	7,98	7,59	8,12	8,57	7,97	7,71	7,54	7,88	8,21	8,89
HC (ppm)	1036,00	1023,00	967,00	911,00	910,00	912,00	975,00	946,00	873,00	857,00	855,00	818,00	879,00	912,00	932,00	915,00	876,00	896,00	884,00	932,00
Lambda	0,91	0,87	1,05	0,93	0,89	0,90	1,05	0,89	0,91	0,97	0,98	0,97	0,99	0,98	0,98	0,95	0,97	0,98	0,97	0,97