



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE INYECCIÓN DIESEL  
HYUNDAI PORTER MEDIANTE EL SUMINISTRO DE HIDRÓGENO AL SISTEMA DE  
ADMISIÓN DE AIRE**

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

AUTORES: DIEGO RICARDO JARA RÍOS

ÁNGEL PATRICIO PEÑA TAMAY

TUTOR: ING. CHRISTIAN OMAR PULLA MOROCHO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2025

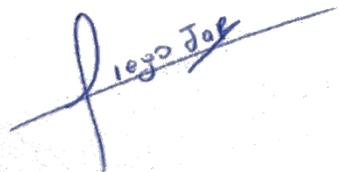
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Diego Ricardo Jara Ríos con documento de identificación N° 070645365 y Ángel Patricio Peña Tamay con documento de identificación N° 0302316716; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 30 de enero del 2025

Atentamente,



---

Diego Ricardo Jara Ríos

070645365



---

Ángel Patricio Peña Tamay

0302316716

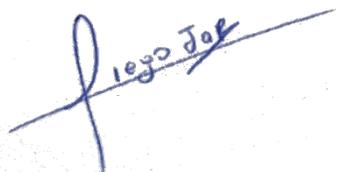
## CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Diego Ricardo Jara Ríos con documento de identificación N° 070645365 y Ángel Patricio Peña Tamay con documento de identificación N° 0302316716, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis de emisiones contaminantes de un motor de inyección diesel Hyundai Porter mediante el suministro de hidrógeno al sistema de admisión de aire”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 30 de enero del 2025

Atentamente,



---

Diego Ricardo Jara Ríos

070645365



---

Ángel Patricio Peña Tamay

0302316716

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Omar Pulla Morocho con documento de identificación N° 0103570602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE INYECCIÓN DIESEL HYUNDAI PORTER MEDIANTE EL SUMINISTRO DE HIDRÓGENO AL SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE, realizado por Diego Ricardo Jara Ríos con documento de identificación N° 070645365 y por Ángel Patricio Peña Tamay con documento de identificación N° 0302316716, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de enero del 2025

Atentamente,



---

Ing. Christian Omar Pulla Morocho, MSc.

0103570602

## DEDICATORIA

*Quiero dedicar este proyecto con todo mi cariño y profundo agradecimiento a mis padres y a toda mi familia. Ellos han sido mi pilar, las personas que, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, me han dado la oportunidad de llegar hasta este momento. Gracias a su confianza en mí, a su dedicación y a los innumerables sacrificios que han hecho a lo largo de mi vida, hoy puedo mirar al futuro con esperanza y orgullo. Cada paso que he dado, cada desafío superado, ha sido posible gracias a su apoyo constante.*

*Este proyecto no es solo el resultado de mi trabajo, sino también un reflejo de todo lo que ellos han hecho por mí. Es mi forma de rendir homenaje a su amor, su entrega y los valores que me han inculcado. Sin su presencia constante a lo largo de este camino, alcanzar esta meta habría sido impensable.*

**Diego Ricardo Jara Ríos**

## AGRADECIMIENTO

*Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien me ha dado la fortaleza y la dirección necesarias para superar cada obstáculo y seguir adelante con este proyecto. Sin Su constante apoyo, no habría sido posible llegar hasta este punto.*

*A mis padres, gracias por el regalo invaluable de la educación y por su amor sin condiciones. Han creído en mí desde siempre y me han dado todo lo necesario para enfrentar la vida con coraje y determinación. Lo que alguna vez fue solo un sueño, hoy se convierte en una realidad gracias a su sacrificio y dedicación incansable.*

*A mis compañeros de trabajo, mi sincero agradecimiento por su colaboración y apoyo a lo largo de este proceso. Gracias por compartir este camino conmigo y estar siempre dispuestos a ayudar y acompañarme.*

*A mi familia, gracias por ser mi refugio y mi constante fuente de motivación y fortaleza. Su respaldo incondicional me ha impulsado a seguir adelante en los momentos más desafiantes.*

*Al Ingeniero Christian Pulla, nuestro tutor, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento por su orientación, paciencia y siempre estar dispuesto a ayudar.*

*Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo de todos ustedes, y es un privilegio poder compartirlo. ¡Gracias, por todo!*

***Diego Ricardo Jara Ríos***

## DEDICATORIA

*El presente proyecto quiero dedicarlo con todo mi cariño, gratitud y admiración a mis padres, Luis Peña y Carmen Tamay. Ellos han sido mi pilar, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, me han permitido llegar hasta aquí. Gracias a su fe en mí, a su dedicación y a los innumerables sacrificios que han hecho a lo largo de mi vida, hoy puedo mirar hacia el futuro con esperanza y orgullo. Cada uno de sus esfuerzos ha sido fundamental para que pudiera superar los desafíos, aprender de las adversidades y avanzar en mi camino hacia la realización de mis sueños.*

*Este trabajo no solo refleja el esfuerzo que he puesto, sino también el reflejo de todo lo que ellos han hecho por mí. Es un homenaje a su amor, su dedicación y a los valores que me han transmitido. Sin su apoyo constante, nunca habría sido posible alcanzar esta meta.*

*Por todo esto y mucho más, este logro es también suyo. Dedico este proyecto a ellos, con el más profundo respeto y gratitud.*

***Ángel Patricio Peña Tamay***

## AGRADECIMIENTO

*Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por darme la fuerza y la guía necesarias para superar los obstáculos y continuar con este proyecto. Sin Su apoyo constante, no habría sido posible avanzar y llegar hasta aquí.*

*A mis padres, por el invaluable regalo del estudio y por su amor incondicional. Ellos siempre han creído en mí y me han brindado todo su apoyo, dándome las herramientas para enfrentar la vida con determinación. Lo que en algún momento fue solo un sueño, hoy es una meta alcanzada gracias a su sacrificio y dedicación.*

*A mis amigos de trabajo, por su colaboración y apoyo durante todo este proceso. Gracias por compartir este camino y por estar siempre dispuestos a brindar su ayuda y compañía.*

*A mi familia, por estar siempre a mi lado, brindándome el respaldo necesario para seguir adelante, y por ser mi fuente constante de motivación y fortaleza.*

*A mi pareja, por su paciencia, amor y comprensión. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y por estar a mi lado, animándome a seguir adelante y celebrando cada uno de mis logros.*

*A nuestro tutor, Ing. Christian Pulla, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento por su valiosa asesoría y constante disposición.*

*Este éxito es fruto del esfuerzo conjunto de todos ustedes, y es un honor poder compartirlo. ¡Gracias de corazón!*

***Ángel Patricio Peña Tamay***

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo investigar el uso del hidrógeno como complemento en motores diésel, comenzando con una revisión exhaustiva de la literatura científica sobre las tecnologías de suministro de hidrógeno. A través de la exploración de bases de datos académicos, se identifican avances recientes, técnicas efectivas y brechas de conocimiento en la integración del hidrógeno en motores diésel.

Posteriormente, se desarrolló un diseño experimental para medir las emisiones contaminantes del motor mediante el suministro de hidrógeno en concentraciones de 0%, 25%, 50% y 75%. Las pruebas se realizaron bajo dos condiciones de funcionamiento: ralentí y 2500 rpm.

Finalmente, los datos recolectados fueron analizados mediante un software estadístico, lo que permitió identificar las variaciones en las emisiones de contaminantes según los diferentes porcentajes de hidrógeno, Suministrando detalles importantes para la optimización del uso de hidrógeno en motores diésel.

## **ABSTRACT**

This study aims to investigate the use of hydrogen as a supplement in diesel engines, starting with an exhaustive review of the scientific literature on hydrogen supply technologies. Through the exploration of academic databases, recent advancements, effective techniques, and knowledge gaps in the integration of hydrogen into diesel engines were identified

Subsequently, an experimental design was established to measure the engine's pollutant emissions by supplying hydrogen at concentrations of 0%, 25%, 50%, and 75%. Tests were conducted under two operating conditions: idle and 2500 rpm.

Finally, the collected data were analyzed using statistical software, allowing for the identification of variations in pollutant emissions according to different hydrogen concentrations, providing valuable insights for optimizing the use of hydrogen in diesel engines.

## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>XXV</b>
<b>PROBLEMA .....</b>	<b>XXVII</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>Importancia y alcances .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>Delimitación.....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>XXIXX</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>30</b>
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>30</b>
<b>1.1 HIDRÓGENO .....</b>	<b>30</b>
<b>1.1.1 Características del Hidrógeno .....</b>	<b>30</b>
<b>1.1.2 Propiedades del hidrógeno.....</b>	<b>31</b>
<b>1.2 GENERADOR DE HIDRÓGENO .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3 COMPONENTES DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4 DIÉSEL.....</b>	<b>34</b>
<b>1.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL DIÉSEL .....</b>	<b>34</b>
<b>1.5 OPACIDAD .....</b>	<b>35</b>
<b>1.6 NORMATIVAS EMPLEADAS .....</b>	<b>36</b>

<b>1.7 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.....</b>	<b>37</b>
<b>1.8 CICLO DIÉSEL .....</b>	<b>38</b>
<b>1.9 OPACÍMETRO AUTOMOTRIZ MET 6.2.....</b>	<b>41</b>
<b>1.10 EMISIONES CONTAMINANTES.....</b>	<b>44</b>
<b>1.11 EFECTOS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES.....</b>	<b>45</b>
<b>1.12 MOTOR DE PRUEBA.....</b>	<b>47</b>
<b>1.13 SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE.....</b>	<b>48</b>
<b>1.14 MODIFICACIONES CON HIDRÓGENO.....</b>	<b>50</b>
<b>1.15 EFECTOS DEL HIDRÓGENO EN EL SISTEMA DE ADMISIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>1.16 COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE ADMISIÓN CONVENCIONALES.....</b>	<b>52</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>54</b>
<b>METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS DE EMISIONES CONTAMINANTES MEDIANTE EL SUMINISTRO DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DIÉSEL.....</b>	<b>54</b>
<b>2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>55</b>
<b>2.2 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>56</b>
<b>2.3 RECONOCIMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>58</b>
<b>2.4 VARIABLES DE RESPUESTA.....</b>	<b>59</b>
<b>2.5 VARIABLES CONTROLABLES .....</b>	<b>59</b>
<b>2.6 FACTORES Y NIVELES.....</b>	<b>59</b>

<b>2.7 PORCENTAJES DE HIDRÓGENO INGRESADO EN LA ADMISIÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>2.8 RÉGIMEN DE GIRO DEL MOTOR.....</b>	<b>60</b>
<b>2.9 VARIABLES DE BLOQUEO.....</b>	<b>61</b>
<b>2.10 SELECCIÓN DE MOTOR DE PRUEBA - HYUNDAI PORTER MODELO G- 130301 .....</b>	<b>63</b>
<b>2.11 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR SELECCIONADO .....</b>	<b>64</b>
<b>2.12 PUESTA A PUNTO DEL MOTOR.....</b>	<b>64</b>
<b>2.13 INSPECCIÓN VISUAL DEL MOTOR.....</b>	<b>65</b>
<b>2.14 PROCESO DE PREPARACIÓN DEL MOTOR.....</b>	<b>67</b>
<b>2.15 CONDICIONES AMBIENTALES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS .....</b>	<b>68</b>
<b>2.16 OBTENCIÓN DE OPACIDAD EN FUNCIÓN DE LAS MEZCLAS DE HIDRÓGENO.....</b>	<b>70</b>
<b>2.17 OPACIDAD DE LAS MUESTRAS MEDIANTE EL FACTOR K.....</b>	<b>79</b>
<b>2.18 OBTENCIÓN DE EMISIONES EN FUNCIÓN DE LAS MEZCLAS DE HIDRÓGENO .....</b>	<b>82</b>
<b>2.19 EMISIONES GENERADAS .....</b>	<b>89</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>92</b>
<b>ANÁLISIS DE LA OPACIDAD Y EMISIONES GENERADAS CONFORME A LAS MUESTRAS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS .....</b>	<b>92</b>
<b>3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO .....</b>	<b>92</b>
<b>3.2 MEDICIONES DE OPACIDAD .....</b>	<b>93</b>

<b>3.3 MATERIAL PARTICULADO (PM)</b> .....	93
<b>3.4 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES</b> .....	94
<b>3.5 EMISIONES DE CO (MONÓXIDO DE CARBONO)</b> .....	94
<b>3.6 EMISIONES DE CO<sub>2</sub> (DIÓXIDO DE CARBONO)</b> .....	94
<b>3.7 LAMBDA (<math>\lambda</math>)</b> .....	94
<b>3.8 MEDICIONES DE OXÍGENO (O<sub>2</sub>)</b> .....	95
<b>3.9 EMISIONES DE NO<sub>x</sub> (ÓXIDOS DE NITRÓGENO)</b> .....	95
<b>3.10 VALIDACIÓN DE LOS DATOS</b> .....	95
<b>3.11 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	96
<b>3.12 ANÁLISIS GRÁFICO DE LA OPACIDAD DEL MOTOR DIÉSEL</b> .....	97
<b>3.13 ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN</b> .....	98
<b>3.14 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO<sub>2</sub> CON 0% DE HIDRÓGENO</b> .....	99
<b>3.15 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO<sub>2</sub> CON 25% DE HIDRÓGENO</b> .....	100
<b>3.16 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO<sub>2</sub> CON 50% DE HIDRÓGENO</b> .....	101
<b>3.17 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO<sub>2</sub> CON 75% DE HIDRÓGENO</b> .....	102
<b>3.18 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)</b> .....	103
<b>3.19 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NOX CON 0% DE HIDRÓGENO</b> .....	104
<b>3.20 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NOX CON 25% DE HIDRÓGENO</b> .....	105
<b>3.21 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NOX CON 50% DE HIDRÓGENO</b> .....	106
<b>3.22 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NOX CON 75% DE HIDRÓGENO</b> .....	107

<b>3.23 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)</b>	
.....	108
<b>3.24 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL OXÍGENO (O<sub>2</sub>)</b>	109
<b>3.25 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL MONÓXIDO DE CARBONO (CO%)</b>	110
<b>3.26 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	111
<b>CONCLUSIONES</b>	117
<b>RECOMENDACIONES</b>	118
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	119
<b>ANEXOS</b>	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 0.1</b>	Delimitación geográfica del proyecto técnico.....	XXVIII
<b>Figura 1.1</b>	Propiedades del hidrógeno .....	31
<b>Figura 1.2</b>	Imagen del nivel correcto para la generación de hidrógeno.....	32
<b>Figura 1.3</b>	Generador de hidrógeno .....	33
<b>Figura 1.4</b>	Propiedades del diésel .....	35
<b>Figura 1.5</b>	Filtro de partículas.....	36
<b>Figura 1.6</b>	Funcionamiento motor Diesel .....	37
<b>Figura 1.7</b>	Diagrama termodinámico V-p .....	41
<b>Figura 1.8</b>	Datos técnicos de opacímetro.....	42
<b>Figura 1.9</b>	Opacímetro .....	43
<b>Figura 1.10</b>	Opacidad.....	43
<b>Figura 1.11</b>	Emisiones contaminantes .....	45
<b>Figura 1.12</b>	Daño causado por las emisiones.....	47
<b>Figura 1.13</b>	Motor Hyundai Porte. ....	48
<b>Figura 1.14</b>	Sistema de admisión de aire .....	49
<b>Figura 1.15</b>	Emisiones de NOx.....	51
<b>Figura 1.16</b>	Sistema convencional vs Sistema con hidrógeno.....	53
<b>Figura 2.1</b>	Esquema del proceso de un diseño de experimento .....	55
<b>Figura 2.2</b>	Diseño de dos factores.....	56
<b>Figura 2.3</b>	Diseño de tres factores .....	57
<b>Figura 2.4</b>	Resumen del diseño experimental.....	57
<b>Figura 2.5</b>	Orden del diseño experimental para la obtención de muestras .....	58

<b>Figura 2.6</b>	Ciclos de aceleración libre .....	60
<b>Figura 2.7</b>	Ingreso del hidrógeno en la admisión.....	61
<b>Figura 2.8</b>	Flujograma de la metodología utilizada para adquirir datos .....	62
<b>Figura 2.9</b>	Motor Hyundai Porter .....	63
<b>Figura 2.10</b>	Medición de compresión motor diésel .....	65
<b>Figura 2.11</b>	Mangueras y cañerías .....	66
<b>Figura 2.12</b>	Cambio de aceite del motor.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 2.13</b>	Inspección visual de filtro de aceite del motor.....	67
<b>Figura 2.14</b>	Conexión de sonda al conducto de escape .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 2.15</b>	Prueba Opacidad 1 (Ralentí) .....	71
<b>Figura 2.16</b>	Prueba Opacidad 1 (2500 rpm) .....	72
<b>Figura 2.17</b>	Prueba Opacidad 2 (Ralentí) .....	73
<b>Figura 2.18</b>	Prueba Opacidad 2 (2500 rpm) .....	74
<b>Figura 2.19</b>	Prueba Opacidad 3 (Ralentí) .....	75
<b>Figura 2.20</b>	Prueba Opacidad 3 (2500 rpm) .....	76
<b>Figura 2.21</b>	Prueba Opacidad 4 (Ralentí) .....	77
<b>Figura 2.22</b>	Prueba Opacidad 4 (2500 rpm) .....	78
<b>Figura 2.23</b>	Valores de la opacidad.....	80
<b>Figura 2.24</b>	Límites de valores de la opacidad .....	81
<b>Figura 2.25</b>	Prueba Emisiones 1 (Ralentí) .....	82
<b>Figura 2.26</b>	Prueba Emisiones 1 (2500 rpm) .....	83
<b>Figura 2.27</b>	Prueba Emisiones 2 (Ralentí) .....	84
<b>Figura 2.28</b>	Prueba Emisiones 2 (2500 rpm) .....	85

<b>Figura 2.29</b> Prueba Emisiones 3 (Ralentí).....	86
<b>Figura 2.30</b> Prueba Emisiones 3 (2500 rpm).....	87
<b>Figura 2.31</b> Prueba Emisiones 4 (Ralentí).....	88
<b>Figura 2.32</b> Prueba Emisiones 4 (2500 rpm).....	89
<b>Figura 2.33</b> Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de diésel (prueba dinámica) a partir del año modelo 2000 (ciclos americanos).....	90
<b>Figura 3.1</b> Análisis de la opacidad.....	97
<b>Figura 3.2</b> Análisis de las partículas en suspensión.....	98
<b>Figura 3.3</b> Análisis de Co2 con 0% de hidrógeno.....	99
<b>Figura 3.4</b> Análisis de Co2 con 25% de hidrógeno.....	100
<b>Figura 3.5</b> Análisis de Co2 con 50% de hidrógeno.....	101
<b>Figura 3.6</b> Análisis de Co2 con 75% de hidrógeno.....	102
<b>Figura 3.7</b> Análisis general del CO2.....	103
<b>Figura 3.8</b> Análisis del NOX con 0% de hidrógeno.....	104
<b>Figura 3.9</b> Análisis del NOX con 25% de hidrógeno.....	105
<b>Figura 3.10</b> Análisis del NOX con 50% de hidrógeno.....	106
<b>Figura 3.11</b> Análisis del NOX con 75% de hidrógeno.....	107
<b>Figura 3.12</b> Análisis general de los NOX.....	108
<b>Figura 3.13</b> Análisis general del O2.....	109
<b>Figura 3.14</b> Análisis general del CO.....	1100
<b>Figura 3.15</b> Variacion de Opacidad.....	107
<b>Figura 3.16</b> Partículas en suspensión.....	108
<b>Figura 3.17</b> Monóxido de Carbono.....	109

<b>Figura 3.18</b>	Dióxido de carbono .....	110
<b>Figura 3.19</b>	Óxidos de nitrógeno .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Componentes del generador de hidrógeno .....	33
<b>Tabla 2.1</b> Factores y Niveles del diseño de experimento. ....	59
<b>Tabla 2.2</b> Variables de bloqueo en el diseño de experimento.....	62
<b>Tabla 2.3</b> Especificaciones técnicas del motor.....	64
<b>Tabla 2.4</b> Condiciones externas – Cuenca, Ecuador .....	69
<b>Tabla 2.5</b> Porcentajes de opacidad. ....	81
<b>Tabla 2.6</b> Valores de las emisiones obtenidas en las pruebas.....	91

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Ficha técnica del analizador de gases .....	121
<b>Anexo 2</b> Modificaciones en el generador de hidrógeno .....	122
<b>Anexo 3</b> Caudalímetro usado en el generador .....	123

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación se enfoca en analizar las emisiones contaminantes generadas por un motor diésel de inyección Hyundai Porter al incorporar hidrógeno en su sistema de admisión de aire. Las emisiones de los motores diésel han sido un tema recurrente de estudio debido a su considerable impacto en la calidad del aire y la salud pública. Como respuesta a la creciente necesidad de reducir los gases nocivos, se ha propuesto el uso de hidrógeno como aditivo alternativo en los motores de combustión interna, especialmente en los motores diésel, con el objetivo de optimizar la eficiencia de la combustión y reducir las emisiones de partículas y gases contaminantes.

Este proyecto busca evaluar el impacto ambiental del suministro de hidrógeno en concentraciones variables, mediante un enfoque experimental que permitirá medir las emisiones bajo diferentes condiciones operativas. Se realizarán mediciones a ralentí y a 2500 rpm, empleando un opacímetro para evaluar el nivel de opacidad de los gases emitidos, lo cual representa un factor crucial para determinar la cantidad de partículas contaminantes en los gases de escape.

La incorporación de la tecnología de hidrógeno en motores diésel es una innovación con un gran potencial para reducir las emisiones contaminantes de manera significativa. Sin embargo, todavía existen áreas de conocimiento que requieren ser exploradas, y este proyecto busca aportar al avance en este ámbito a través de una revisión detallada de la literatura, experimentación y análisis de los resultados obtenidos.

## **PROBLEMA**

En las últimas décadas, el sector del transporte ha sido uno de los mayores responsables de la contaminación del aire, principalmente por el uso extensivo de combustibles fósiles, como el diésel, que produce gases perjudiciales para la salud humana y el entorno. Entre estos contaminantes se incluyen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y las partículas (PM), los cuales contribuyen al deterioro de la calidad del aire y al cambio climático. (European Environment Agency, 2021)

La creciente preocupación por los efectos adversos de estas emisiones ha impulsado el desarrollo de normativas ambientales más rigurosas, que exigen una significativa reducción en los niveles de contaminación generados por los motores de combustión interna. Esto ha llevado a los fabricantes y a la comunidad científica a investigar soluciones innovadoras para hacer más eficientes los motores y reducir sus impactos negativos. (Mendiara, 2019)

En este contexto, el uso de hidrógeno como aditivo en el suministro de aire en los motores diésel podría mejorar el proceso de combustión y generar menos contaminantes, reduciendo de esta manera el impacto ambiental.

## **Antecedentes**

El empleo de hidrógeno como aditivo en el sistema de admisión de aire del motor diésel surge como una opción prometedora para optimizar la eficiencia del motor y disminuir las emisiones contaminantes. No obstante, la aplicación exitosa de esta tecnología demanda un conocimiento profundo de su efecto sobre el rendimiento del motor y la calidad de las emisiones.

En el estudio de las emisiones de un motor diésel suministrado con hidrógeno, se puede vincular este estudio con los de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el (7), que busca garantizar el acceso a energía limpia, segura y asequible, y el (13), que promueve acciones urgentes para combatir el cambio climático. Ambos destacan la importancia de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y la reducción de emisiones contaminantes, lo cual es relevante en investigaciones que exploran el uso de hidrógeno como una alternativa para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los motores diésel.

## **Importancia y alcances**

La relevancia de este estudio radica en su aporte a la búsqueda de soluciones sostenibles en la industria del transporte, especialmente en lo que respecta a la disminución de las emisiones contaminantes en motores diésel.

Al analizar el uso del hidrógeno como complemento, el estudio aborda una de las principales preocupaciones medioambientales: las emisiones de gases tóxicos y de efecto invernadero generadas por los motores tradicionales.

Al evaluar distintas concentraciones de hidrógeno, este trabajo ofrece una alternativa innovadora que podría reducir la huella de carbono de los motores diésel, sin necesidad de una transformación radical en la infraestructura actual.

## **Delimitación**

El presente estudio se llevó a cabo en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. Su ubicación es: Calle Vieja 12-13 y Elia Liut (Cuenca, Azuay – Ecuador).

### **Figura 0.1**

*Delimitación geográfica del proyecto técnico*



*Nota:* Laboratorios de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. Fuente: Autores

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Analizar las emisiones contaminantes de un motor de inyección diésel Hyundai Porter, mediante el suministro de hidrógeno al sistema de admisión de aire para el conocimiento del impacto ambiental que generan estas emisiones.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión exhaustiva de la literatura sobre tecnologías de suministro de hidrógeno para motores diésel, mediante la indagación en bases de datos científicas sobre avances recientes, técnicas efectivas y brechas de conocimiento en la integración de hidrógeno en estos motores.
- Establecer un diseño experimental para la determinación de emisiones contaminantes mediante el suministro de hidrógeno en concentraciones del 0%, 25%, 50% y 75%, bajo condiciones de funcionamiento a ralentí y 2500 rpm, utilizando el opacímetro.
- Analizar los resultados obtenidos de las emisiones del motor utilizando un software estadístico.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1 Hidrógeno

El hidrógeno, el elemento más ligero y abundante en el universo, se emplea como un combustible limpio que, al combinarse con oxígeno, produce electricidad y agua sin generar emisiones contaminantes. Su interés en el sector energético y automotriz ha crecido debido a su potencial para reducir las emisiones de gases contaminantes y su capacidad para generar energía sin producir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) directamente. A continuación, se destacan algunos aspectos clave sobre el hidrógeno:

#### 1.1.1 Características del Hidrógeno

- **Símbolo químico:** H<sub>2</sub>.
- **Fuente de energía limpia:** Al ser utilizado en celdas de combustible, el hidrógeno se fusiona con oxígeno para generar electricidad, calor y agua como subproducto, lo que lo convierte en una alternativa amigable con el medio ambiente.
- **Ligero y altamente energético:** Es el gas más liviano y tiene una densidad energética por masa alta, lo que lo hace adecuado para aplicaciones como el almacenamiento de energía y el transporte.
- **Versátil:** Puede producirse a partir de diversas fuentes, incluyendo gas natural, energía solar, eólica e incluso agua, mediante electrólisis.

### 1.1.2 Propiedades del hidrógeno

#### Alto contenido energético

El hidrógeno posee una alta densidad de energía por unidad de masa, (119.9 MJ/kg), casi tres veces mayor que la gasolina. Esto permite un rendimiento energético eficiente, además el hidrógeno tiene una velocidad de combustión mayor que los combustibles convencionales lo que mejora la eficiencia de los motores y permite una combustión más rápida y completa.

Lo que reduce de manera significativa las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) y mejora el rendimiento térmico del motor.

#### Figura 1.1

##### *Propiedades del hidrógeno*

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad (0 °C, 1 atm)	0.08988	kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de ebullición	-252.87	°C
Rango de ignición en aire	4% - 75%	% (v/v)
Peso molecular	2.016	g/mol
Punto de fusión	-259.16	°C
Calor específico (Cp)	14.304	J/g·K

*Nota:* Imagen representativa de las propiedades principales del hidrógeno.

### 1.2 Generador de hidrógeno

El generador para utilizar fue producido o elaborado por (TOROCHE CRIOLLO & AGILA MACAS, 2023) en un generador encargado de la elaboración del hidrógeno por medio de un

proceso de electrólisis, tiene una conexión a un módulo Arduino con el objetivo de que el usuario utilice de la mejor manera que desee.

El generador tiene una composición por medio de placas de acero inoxidable de 304 las que están enlazados entre si los cuales son los encargados de producir la electrólisis en el sistema, el generador por celdas secas es el que produce el hidrógeno y oxígeno gaseoso, lo que puede ser almacenado y recolectado para la utilización en la alimentación de vehículos. (PARRA, 2024)

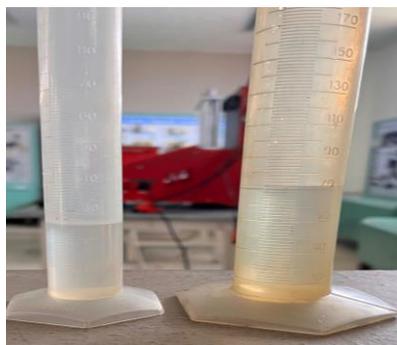
### 1.2.1 Mezcla de combustible con el hidrógeno

El hidrógeno se presenta como un combustible con ventajas en comparación con los tradicionales como la gasolina y el diésel, destacándose por su mayor velocidad de propagación de la llama, menor distancia de extinción y mayor capacidad de difusión, el motor a una combustión ideal de volumen constante, lo que podría resultar en un aumento de la eficiencia.

Para permitir la electrólisis en el sistema, se utilizará hidróxido de sodio como componente electrolítico en una cantidad de 25 ml mientras que el agua destilada 75 ml ya que como se pudo apreciar en el análisis realizado en Minitab, es en esta mezcla cuando las emisiones reducen de manera significativa. (CRIOLLO, 2023)

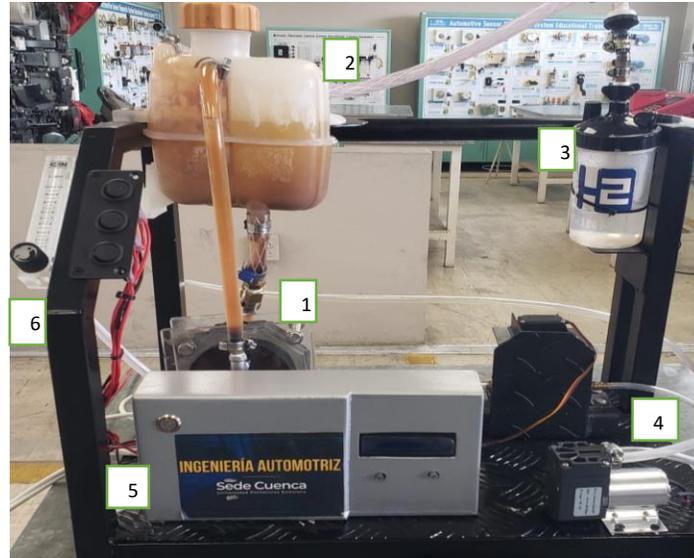
### Figura 1.2

*Imagen del nivel correcto para la generación de hidrógeno. Fuente: Autores*



**Figura 1.1**

*Generador de hidrógeno*



*Nota:* Generador de hidrógeno presente en el taller automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Fuente: Autores

### 1.3 COMPONENTES DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO

A continuación, se presenta una tabla de los componentes del generador de hidrógeno:

**Tabla 1.1**

*Componentes del generador de hidrógeno*

Elemento	Descripción
1. Célula de electrólisis	Separa el agua en hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis.
2. Contenedor de agua	Almacena el agua que se utiliza como materia prima en la electrólisis.
3. Separador de vapor de agua	Separa el vapor de agua del hidrógeno producido.
4. Bomba de agua	Mantiene el flujo continuo de agua hacia la célula de electrólisis.
5. Regulador electrónico	Permite variar diferentes porcentajes de hidrógeno.

*Nota:* En la tabla se evidencian los principales componentes que están presentes en un generador de hidrógeno. Fuente: Autores

## 1.4 DIÉSEL

El diésel es un combustible líquido obtenido del petróleo, empleado principalmente en motores diésel para vehículos y equipos pesados.

### 1.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL DIÉSEL

- **Composición** El diésel es una combinación de hidrocarburos líquidos obtenidos a través de la destilación del petróleo crudo. Su composición puede variar según la fuente y el proceso de refinamiento, pero típicamente incluye parafinas, naftenos y aromáticos.
- **Punto de ebullición:** El diésel tiene un punto de ebullición que varía entre 180°C y 360°C, dependiendo del tipo de diésel y el proceso de refinamiento. Esta característica permite que el combustible se convierta en vapor en el proceso de combustión del motor.
- **Densidad:** La densidad del diésel varía entre 0.82 y 0.85 g/cm<sup>3</sup> a 15°C. Esta densidad es mayor que la de la gasolina, lo que significa que el diésel tiene una mayor energía por unidad de volumen.
- **Viscosidad:** El diésel tiene una viscosidad relativamente alta en comparación con otros combustibles líquidos. Esto influye en la forma en que el combustible se atomiza e inyecta en el motor.

**Figura 1.2**

*Propiedades del diésel*

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de Inflación	°C	51.0	--	NTE INEN 1493 PROCEDIMIENTO A
Φ Contenido de agua y sedimento	%	--	0.05	NTE INEN 1494
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	--	0.15	NTE INEN 1491
W Contenido de cenizas	%	--	0.01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	--	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	2.0	5.0	NTE INEN 810
W Contenido de azufre	%peso (ppm)	--	0.05 500	ASTM 4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	--	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	--	45.0	--	NTE INEN 1495
Contenido de biodiesel, φ Biodiesel	%	5	10	NTE INEN 14078
*NOTA				
NOT A: De no contener biodiesel no es necesario la realización de este ensayo				

*Nota:* Imagen representativa de las propiedades del diésel.

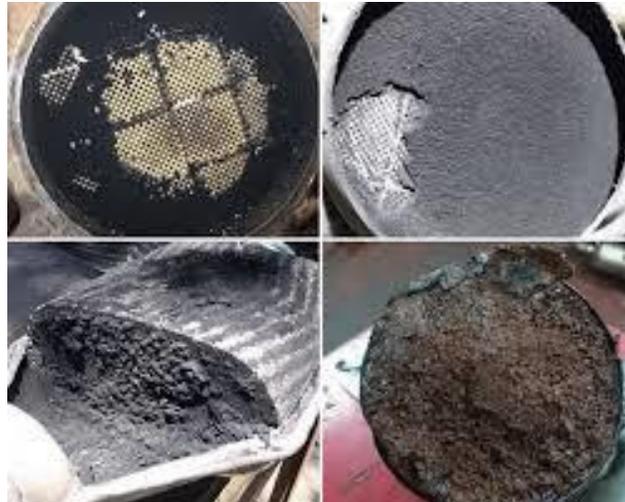
### **1.5 OPACIDAD**

La opacidad es una medida de la cantidad de luz que los gases de escape reducen o bloquean debido a las partículas suspendidas. En el caso de las emisiones de motores diésel, la opacidad es un indicador clave de la cantidad de material particulado (PM) en los gases de escape.

Un aumento en la opacidad suele indicar una mayor concentración de partículas, lo que puede reflejar una combustión incompleta o problemas en el sistema de filtración de partículas del motor.

### Figura 1.3

#### *Filtro de partículas*



*Nota:* Evidencias del filtro de partículas obstruido producto de combustiones incompletas y acumulación de particulado. Fuente: (DPF REVIVAL , 2023)

### 1.6 NORMATIVAS EMPLEADAS

La Norma INEN 2202: 2013 “**Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores.** Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de diésel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre” define los procedimientos y requisitos técnicos para evaluar el porcentaje de opacidad de las emisiones de escape en vehículos con motores diésel, utilizando el método de aceleración libre.

Este método es empleado para cuantificar la opacidad de los gases expulsados por el sistema de escape, lo que permite evaluar la cantidad de partículas y contaminantes presentes en dichas emisiones (INEN 2202, 2013), con el objetivo de regular y controlar el impacto ambiental de las fuentes móviles diésel.

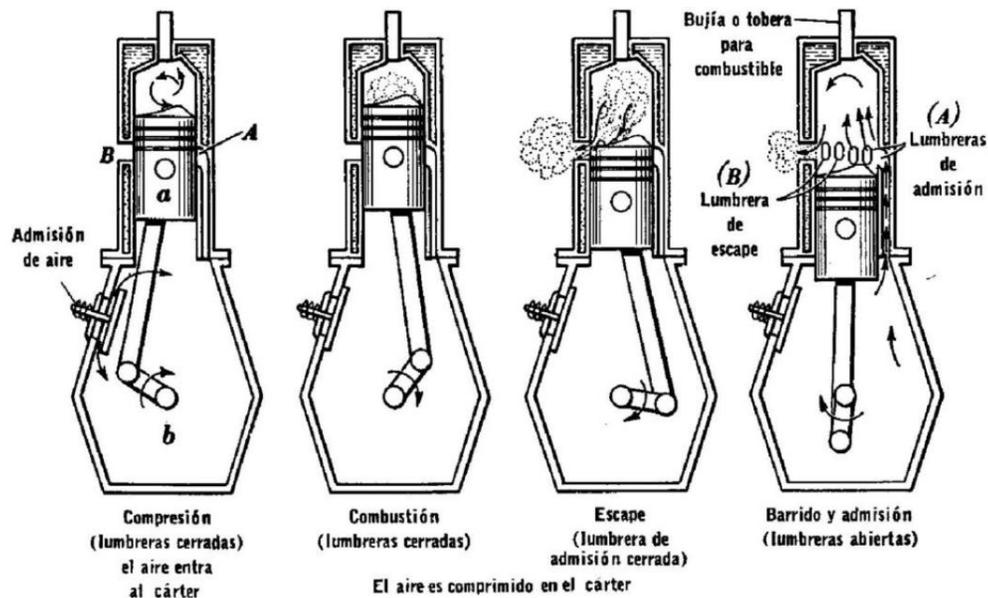
La norma INEN 2207: 2002 “Gestión ambiental. aire. vehículos automotores. límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diésel.” Esta norma establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) de diésel. (INEN 2207, 2002)

### 1.7 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El motor Hyundai Porter es un motor diésel de inyección directa, específicamente diseñado para su uso en vehículos ligeros de carga. Este tipo de motor funciona bajo el principio de combustión por compresión, lo que le permite ser más eficiente en cuanto al consumo de combustible en comparación con los motores de encendido por chispa.

**Figura 1.4**

*Funcionamiento motor Diesel*



*Nota:* Imagen explicativa de cada tiempo de funcionamiento del motor diésel. Fuente: (Alós, 2018)

A continuación, se describe su funcionamiento:

- **Admisión:** En esta fase, la válvula de admisión se abre, permitiendo que entre aire limpio al cilindro. En motores de inyección directa como el del Hyundai Porter, no se mezcla combustible en este momento, lo que mejora la eficiencia volumétrica.
- **Compresión:** Cuando la válvula de admisión se cierra, el pistón sube dentro del cilindro, comprimiendo el aire. Este proceso aumenta significativamente la temperatura y la presión del aire en el cilindro, alcanzando niveles que son suficientes para iniciar la combustión sin la necesidad de una chispa.
- **Inyección de combustible:** Al final de la fase de compresión, el sistema de inyección directa introduce el combustible diésel en forma pulverizada en la cámara de combustión. El combustible se atomiza en pequeñas partículas, lo que facilita su mezcla con el aire caliente. Este sistema permite un control exacto de la cantidad de combustible, lo que mejora la eficiencia y reduce las emisiones.
- **Combustión y expansión:** El aire comprimido, que ya ha alcanzado una alta temperatura, provoca la ignición espontánea del combustible inyectado. La energía liberada durante la combustión empuja el pistón hacia abajo, generando la potencia mecánica requerida para mover el vehículo.
- **Escape:** Finalmente, el pistón asciende nuevamente para expulsar los gases residuales de la combustión a través de la válvula de escape. Estos gases pasan por el sistema de tratamiento de emisiones antes de ser liberados al ambiente.

## 1.8 CICLO DIÉSEL

El ciclo diésel es un proceso termodinámico idealizado que explica cómo los motores de combustión interna diésel generan energía. A diferencia del ciclo Otto, el ciclo diésel emplea la

compresión del aire a alta presión y temperatura para iniciar la combustión, lo que elimina la necesidad de un sistema de encendido por chispa. Este ciclo se compone de cuatro fases principales:

### **Admisión (Proceso Isobárico)**

- En esta fase, el pistón se desplaza hacia abajo desde el punto muerto superior (PMS) hasta el punto muerto inferior (PMI), mientras la válvula de admisión permanece abierta.
- Solo se introduce aire al cilindro, sin que se mezcle con combustible en este momento. La presión dentro del cilindro permanece casi constante durante la fase de admisión.

### **Compresión (Proceso Adiabático)**

- Cuando la válvula de admisión se cierra, el pistón sube, comprimiendo el aire que queda atrapado en el cilindro.
- La compresión es adiabática, lo que significa que no se transfiere calor al exterior; como resultado, tanto la temperatura como la presión del aire aumentan considerablemente.
- En motores diésel, la relación de compresión es alta, típicamente entre 16:1 y 22:1, lo que genera temperaturas de entre 700 y 900 °C, suficientes para encender el combustible.

### **Combustión y Expansión (Proceso Isocórico e Isobárico)**

#### **a) Inyección y Combustión (Isocórica e Isobárica):**

- Cerca del PMS, el sistema de inyección introduce el combustible diésel en la cámara de combustión a alta presión (hasta 2000 bar en sistemas modernos).
- El aire comprimido a alta temperatura enciende automáticamente el combustible en una reacción rápida.
- Inicialmente, la combustión ocurre con un aumento casi constante de volumen (isocórica). Posteriormente, se produce una combustión más lenta y controlada a presión constante (isobárica) a medida que el pistón comienza a descender.

#### **b) Expansión (Proceso Adiabático):**

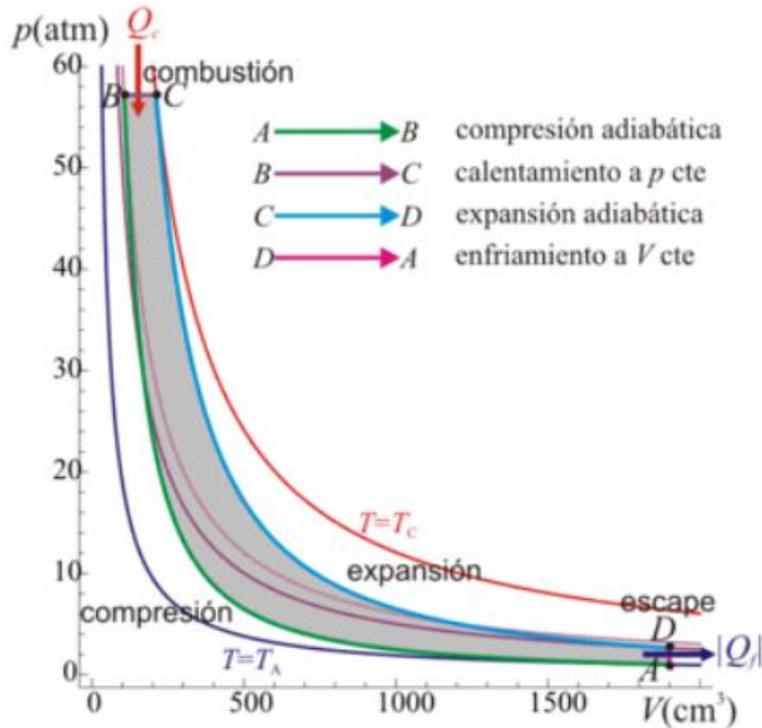
- La combustión produce gases calientes a alta presión que impulsan el pistón hacia abajo, transformando la energía térmica en energía mecánica
- Este es el único proceso del ciclo que genera trabajo útil para mover el vehículo.

#### **Escape (Proceso Isocórico)**

- Al final de la fase de expansión, la válvula de escape se abre y el pistón sube de nuevo, expulsando los gases quemados hacia el sistema de escape.
- En esta fase, el volumen dentro del cilindro permanece constante mientras la presión disminuye.

**Figura 1.5**

*Diagrama termodinámico V-p*



*Nota:* Explicación del diagrama termodinámico del ciclo Diesel. Fuente:(Sevilla, 2013)

### 1.9 OPACÍMETRO AUTOMOTRIZ MET 6.2

El opacímetro es un instrumento utilizado para medir la opacidad de los gases de escape en motores diésel, que indica la cantidad de material particulado (PM) o hollín presente en las emisiones.

Este dispositivo es clave para evaluar la calidad de la combustión y la eficiencia de los sistemas de control de emisiones en motores diésel y cumple un papel importante en las inspecciones de vehículos para verificar su cumplimiento con las normativas ambientales.

A continuación, se detalla una tabla con las especificaciones técnicas correspondientes al opacímetro.

**Figura 1.6**

*Datos técnicos de opacímetro.*

DATOS TÉCNICOS	
Principio de medición	Medición de extinción
Tiempo de calentamiento de la celda de medición	150 s
Dimensión (La x An x Al)	406 x 225 x 160mm
Peso	aprox 4,6 kg
Alimentación de tensión	100-230V 50/60Hz
Conexión a tensión de a bordo	10-30V, DC
Intervalo de medición opacidad	0 - 100 %
Rango de medición coeficiente de absorción	0 - 9,99 m-1
Resolución coeficiente de absorción	0,01 m-1
Rango de medición concentración de partículas	1 - 1100 mg/m3
Resolución concentración de partículas	1 mg/m3

*Nota:* Figura que especifica los datos técnicos propios del opacímetro MET 6.2.

También se incluye una imagen que corresponde al dispositivo opacímetro.

**Figura 1.7**

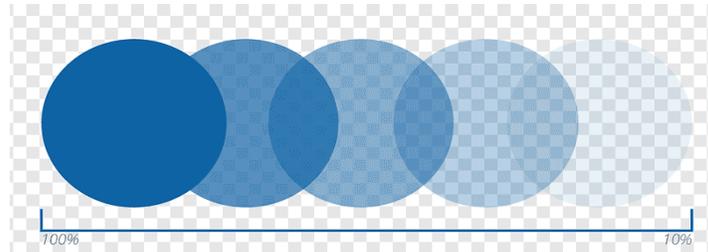
*Opacímetro*



*Nota:* Instrumento de medición de opacidad, opacímetro. Fuente: Autores

## Figura 1.8

### *Opacidad*



*Nota:* Imagen explicativa de la opacidad. Fuente: (Wikipedia, 2022)

## **Analizador de Gases Qrotech QGA 6000**

El analizador de gases Qrotech QGA 6000 se emplea para medir las diversas concentraciones de gases emitidos a través del escape de los vehículos. Este equipo puede funcionar en modo estático o dinámico, permitiendo la medición de los gases del tubo de escape mediante una sonda adecuada. Gracias a su teclado, al finalizar las pruebas necesarias, es posible imprimir los resultados de manera directa o almacenarlos en un ordenador conectado al dispositivo

## Figura 1.11

### *Analizador de gases*



## **1.10 EMISIONES CONTAMINANTES**

Los motores diésel producen varios tipos de emisiones contaminantes que tienen impactos significativos, los principales tipos son:

- **Óxidos de Nitrógeno (NOx)**, entre estos se encuentran el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), que son subproductos de la combustión a alta temperatura. Los NOx favorecen la formación de smog y lluvia ácida, además de generar problemas respiratorios en las personas, particularmente en aquellas con enfermedades pulmonares.
- **Partículas (PM)**, son pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. En los motores diésel, se generan principalmente partículas finas y ultrafinas que pueden penetrar profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, provocando enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Además, las partículas contribuyen a la contaminación visual (smog).
- **Monóxido de Carbono (CO)**, es un gas venenoso, sin color ni olor, generado por la combustión incompleta del combustible. Al ser inhalado, el CO dificulta el transporte de oxígeno en la sangre, lo que puede causar mareos, fatiga y, en situaciones extremas, la muerte. Resulta particularmente peligroso en espacios cerrados.
- **Hidrocarburos no Quemados (HC)**, estos se refieren a compuestos orgánicos derivados de la combustión incompleta del combustible diésel. Estos hidrocarburos pueden reaccionar con los NOx en presencia de luz solar, formando ozono troposférico, que es un componente principal del smog y perjudica la salud respiratoria.
- **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**, Aunque no se considera un contaminante tóxico, el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global,

convirtiéndolo en un subproducto inevitable de la combustión completa de los combustibles fósiles, como el diésel.

### **Figura 1.9**

#### *Emisiones contaminantes*



*Nota:* Emisiones vehiculares en sector urbano. Fuente: (Bardahl, 2016)

### **1.11 EFECTOS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES**

Las emisiones contaminantes de los motores diésel tienen efectos significativos en la salud humana y el medio ambiente, a continuación, se detallan los de mayor controversia:

- ***Problemas Respiratorios:*** la inhalación de partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros contaminantes puede provocar diversos problemas respiratorios, como asma, bronquitis crónica y enfisema. Las partículas finas y ultrafinas tienen la capacidad de penetrar profundamente en los pulmones, irritando las vías respiratorias y disminuyendo la

función pulmonar. Los niños, los adultos mayores y las personas con enfermedades respiratorias previas son especialmente susceptibles a estos efectos.

- ***Enfermedades Cardiovasculares:*** la exposición a largo plazo a contaminantes del aire, como PM y NO<sub>x</sub>, también está asociada con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares. Estos contaminantes pueden desencadenar inflamación sistémica, aumentar la presión arterial y contribuir a la formación de placas en las arterias, lo que incrementa el riesgo de ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares.
- ***Lluvia Ácida:*** los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) pueden reaccionar en la atmósfera para formar ácidos nítricos y sulfúricos, que luego se depositan en la tierra como lluvia ácida. Esta lluvia tiene efectos destructivos en los ecosistemas acuáticos, acidificando lagos y ríos, lo que puede provocar la muerte de peces y otros organismos acuáticos. Además, daña los bosques y los suelos, afectando la vegetación y reduciendo la biodiversidad.
- ***Contribución al Cambio Climático:*** un estudio concluye que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los principales gases de efecto invernadero emitidos por los motores de combustión interna, incluidos los motores diésel. El aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera contribuye al calentamiento global al atrapar el calor en la atmósfera terrestre. Esto resulta en cambios climáticos, como aumento de la temperatura global, derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar y alteraciones en los patrones climáticos.

## **Figura 1.10**

*Daño causado por las emisiones*



*Nota:* Imagen que evidencia el daño que causan las emisiones contaminantes en la sociedad.

### **1.12 MOTOR DE PRUEBA**

El motor que se empleará para las pruebas de funcionamiento será un motor diésel de inyección de la marca Hyundai Porter.

El motor utilizado en el Hyundai Porter (H-100) es un motor diésel de 4 cilindros en línea con una cilindrada de 2.5 litros y una potencia de 130 caballos de fuerza a 3.800 rpm y un torque de 26.5 kg-m a 2.000 rpm.

Este motor está diseñado para ser utilizado en aplicaciones comerciales y de carga, y se ha demostrado que es confiable y resistente en condiciones de uso intensivo (Salinas, 2023).

## Figura 1.11

*Motor Hyundai Porter*



*Nota:* Motor diésel utilizado para el desarrollo del proyecto técnico. Fuente: Autores

### 1.13 SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE

El sistema de admisión de aire es crucial para el funcionamiento eficiente de un motor diésel. Su principal función es suministrar aire limpio y suficiente al cilindro para la combustión.

Este sistema puede incluir varios componentes clave, entre ellos:

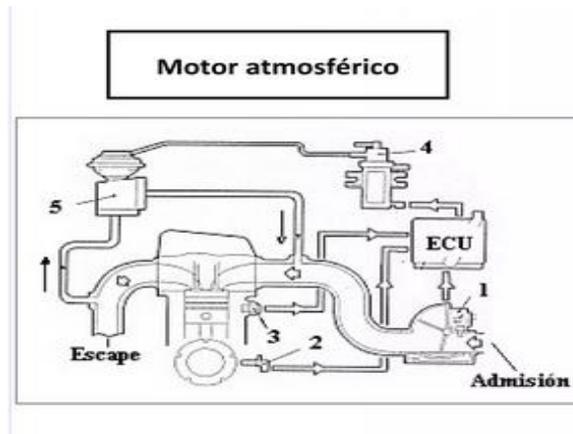
- **Filtro de Aire:** Elimina partículas y contaminantes del aire antes de que entren en el motor.
- **Colector de Admisión:** Distribuye el aire a los cilindros del motor.
- **Sensores de Flujo de Aire y Temperatura:** Miden la cantidad de aire que entra y su temperatura para optimizar la mezcla aire-combustible.

El sistema de admisión afecta directamente el rendimiento del motor. Un suministro adecuado de aire mejora la eficiencia de la combustión, lo que puede aumentar la potencia del motor y reducir el consumo de combustible.

Además, un buen sistema de admisión ayuda a minimizar las emisiones contaminantes al asegurar una combustión más completa.

### Figura 1.12

*Sistema de admisión de aire*



*Nota:* El sistema de admisión de un vehículo diésel atmosférico. Fuente: (Motor, 2014)

La imagen representa un sistema de inyección diésel con riel común, incluye una bomba de alta presión que suministra combustible al riel, donde se acumula antes de ser distribuido a los inyectores. Estos, controlados electrónicamente por la ECU, inyectan el combustible en los cilindros con precisión. También se observan líneas de retorno para el combustible no utilizado, optimizando el rendimiento del sistema.

### 1.14 Modificaciones con Hidrógeno

Incorporar el suministro de hidrógeno en el sistema de admisión de aire consiste en inyectar hidrógeno en el flujo de aire que llega a los cilindros.

El hidrógeno posee una velocidad de llama superior y un rango de inflamabilidad más amplio que el diésel, lo que puede resultar en una combustión más completa y eficiente. Al optimizar la combustión, se reduce la generación de emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO).

### **1.15 Efectos del Hidrógeno en el Sistema de Admisión**

La incorporación de hidrógeno en el sistema de admisión de aire de un motor diésel puede mejorar significativamente la eficiencia de la combustión.

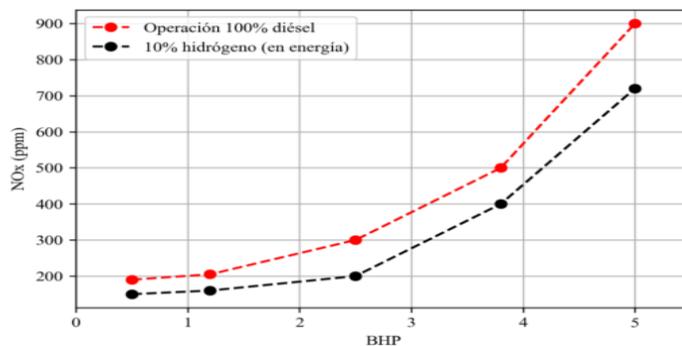
- ***Velocidad de Llama del Hidrógeno:*** El hidrógeno tiene una velocidad de llama mucho más alta que el diésel. Esto significa que la combustión del hidrógeno se completa más rápidamente, lo que puede mejorar la eficiencia térmica del motor. Una combustión más rápida y completa asegura que más energía del combustible se convierta en trabajo útil, lo que puede llevar a un aumento del rendimiento del motor.
- ***Rango de Inflamabilidad:*** El hidrógeno presenta un rango de inflamabilidad más amplio que el diésel, lo que permite que el motor opere de manera eficiente en una mayor variedad de condiciones de mezcla aire-combustible. Esto disminuye la probabilidad de combustión incompleta y mejora la eficiencia global del motor.
- ***Menor Necesidad de Enriquecimiento de Mezcla:*** Los motores diésel generalmente requieren una mezcla aire-combustible enriquecida para lograr una combustión completa. La incorporación de hidrógeno puede disminuir esta necesidad, permitiendo que el motor opere con una mezcla más pobre, lo que mejora la eficiencia del combustible y reduce el consumo total.
- ***Reducción de NOx:*** Los óxidos de nitrógeno (NOx) se generan principalmente por las altas temperaturas de combustión. La incorporación de hidrógeno puede disminuir la

temperatura de combustión al favorecer una combustión más completa y eficiente, lo que a su vez reduce la formación de NOx.

- **Disminución de Partículas (PM):** La combustión incompleta del diésel produce partículas finas y ultrafinas (PM), que son nocivas para la salud. El hidrógeno se quema de manera más limpia que el diésel, lo que reduce la generación de partículas durante la combustión. Esto mejora tanto la calidad del aire como la salud pública.
- **Menores Emisiones de CO y HC:** El monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no quemados (HC) son productos derivados de la combustión incompleta. Dado que el hidrógeno mejora la eficiencia de la combustión, las emisiones de CO y HC se reducen considerablemente. Esto resulta especialmente beneficioso para disminuir los contaminantes que favorecen la formación de ozono troposférico, un componente clave del smog.

**Figura 1.13**

*Emisiones de NOx*



Nota: Se evidencia una disminución en las cantidades de NOx producidas por un motor diésel en función del uso de hidrogeno en el sistema de admisión. Fuente: (Menaca, 2022)

### **1.16 Comparación con Sistemas de Admisión Convencionales**

Un sistema de admisión tradicional emplea solo aire para la combustión del combustible en el motor diésel. El aire se filtra para eliminar partículas y contaminantes, y luego se mezcla con el combustible en los cilindros. La eficiencia de la combustión depende en gran medida de la proporción de la mezcla aire-combustible y de la calidad del aire que entra al motor.

Una mezcla ideal (estequiométrica) garantiza una combustión completa y eficiente, pero cualquier variación de esta mezcla puede disminuir la eficiencia del motor. Los motores diésel con sistemas de admisión convencionales suelen emitir mayores cantidades de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NOx), partículas (PM) y monóxido de carbono (CO), debido a la combustión incompleta y las altas temperaturas. En cambio, en un sistema de admisión modificado con hidrógeno, se inyecta hidrógeno junto con el aire en el sistema de admisión. El hidrógeno se mezcla con el aire antes de ingresar a los cilindros, donde se quema junto con el diésel. La adición de hidrógeno puede mejorar considerablemente la eficiencia de la combustión, ya que el hidrógeno tiene una velocidad de llama más rápida y un rango de inflamabilidad más amplio que el diésel, lo que favorece una combustión más completa y eficiente. Esto puede aumentar la potencia del motor y reducir el consumo de combustible, por lo que el uso de hidrógeno como aditivo puede disminuir significativamente las emisiones de contaminantes.

La combustión más completa y las temperaturas de llama más bajas resultan en menores emisiones de NOx. Además, el hidrógeno no contiene carbono, por lo que no contribuye directamente a las emisiones de CO<sub>2</sub>. También puede reducir las emisiones de partículas (PM) y monóxido de carbono (CO).

## Figura 1.14

*Sistema convencional vs Sistema con hidrógeno.*

Característica	Sistema Convencional	Sistema Modificado con Hidrógeno
Fuente de Combustión	Aire + Diésel	Aire + Diésel + Hidrógeno
Eficiencia de Combustión	Moderada	Alta
Emisiones de NO <sub>x</sub> y PM	Altas	Reducidas
Rendimiento del Motor	Estándar	Mejorado
Impacto Ambiental	Alto	Reducido

*Nota:* Imagen que compara el sistema convencional vs un sistema modificado con hidrógeno, en donde se detallan sus principales características. Fuente: (Villareal, 2024)

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS DE EMISIONES CONTAMINANTES MEDIANTE EL SUMINISTRO DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DIÉSEL**

El crecimiento continuo del parque automotor y la dependencia de los combustibles fósiles han intensificado la preocupación global por las emisiones contaminantes generadas por los motores de combustión interna. En particular, los motores diésel, ampliamente utilizados en aplicaciones comerciales e industriales, son conocidos por sus altas emisiones de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NOx), lo que representa un desafío significativo para cumplir con normativas ambientales más estrictas.

Frente a esta problemática, el hidrógeno emerge como una alternativa prometedora debido a ser un combustible limpio que, al usarse como complemento en motores diésel, puede optimizar la calidad de la combustión, disminuir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, la implementación de sistemas de suministro de hidrógeno demanda una metodología experimental sólida para evaluar su efecto en el rendimiento del motor y las características de las emisiones.

Este trabajo examina la metodología utilizada para realizar pruebas de emisiones contaminantes en un motor diésel modificado con un sistema de suministro de hidrógeno. Se detalla el diseño del sistema integrado, los protocolos de prueba empleados para medir la opacidad de los gases de escape y otros parámetros clave, así como las herramientas utilizadas para analizar los resultados. El objetivo de esta metodología es establecer las bases para un uso eficiente del

hidrógeno en motores diésel, contribuyendo a reducir su impacto ambiental y favoreciendo la transición hacia un transporte más sostenible.

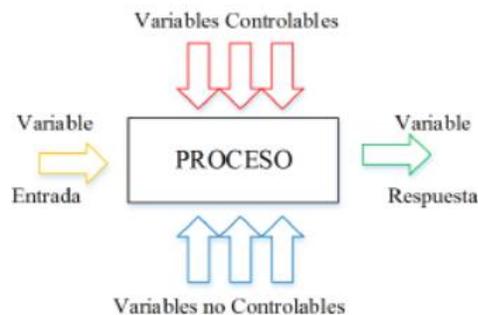
Para asegurar la precisión y la consistencia en los resultados obtenidos, es fundamental implementar un conjunto de procedimientos rigurosamente estructurados. Estos abarcan desde la elección y acondicionamiento del motor utilizado en las pruebas hasta la recopilación de datos experimentales y su posterior análisis detallado.

## 2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de experimentos es un enfoque para organizar los experimentos de manera eficiente y rentable, como se muestra en la figura (Fig. 2.1), con el objetivo de obtener conclusiones relevantes. La selección del diseño experimental depende de las preguntas a responder, el alcance de las conclusiones y los recursos disponibles (material, personal, tiempo). Un experimento bien planificado y ejecutado facilita tanto el análisis estadístico como la interpretación de los resultados.

### Figura 2.1

*Esquema del proceso de un diseño de experimento*



Nota: En la presente imagen se observa un esquema del diseño experimental. Fuente: (MORA, 2022)

## 2.2 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

### Diseño factorial

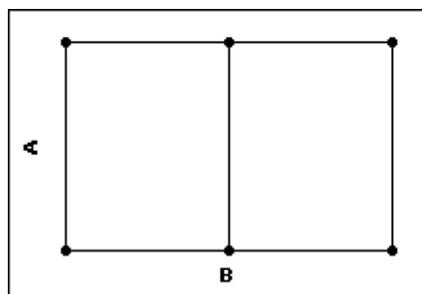
Un diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Al llevar a cabo un experimento, cambiar los niveles de todos los factores simultáneamente en lugar de modificarlos de forma individual permite analizar las interacciones entre los diferentes factores.

En esta investigación se utilizó el diseño factorial para evaluar dos factores donde se tendrán cuatro y dos niveles (máximo, medio, mínimo, nulo) y de dos niveles (ralentí, carga máxima).

El uso del diseño factorial requiere realizar pruebas en el objeto de estudio para evaluar el impacto de las variables. Los experimentos factoriales permiten ajustar cuidadosamente una gran cantidad de variables. Este método tiene sus limitaciones, pero puede ser útil para una investigación más eficiente y para revelar las variables más significativas. (Minitab, 2024)

### Figura 2.2

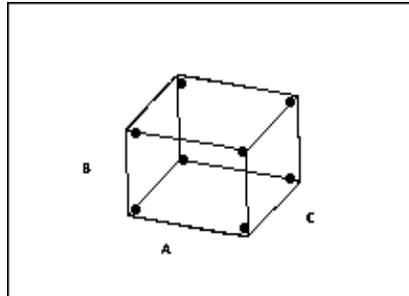
*Diseño de dos factores*



*Nota:* En la presente imagen se observa un diseño que incluyen dos factores. Fuente: (Minitab, 2024)

### Figura 2.3

#### *Diseño de tres factores*



*Nota:* En la presente imagen se observa un diseño de tres factores. Fuente: (Minitab, 2024)

Los diseños factoriales completos consisten en llevar a cabo todas las posibles combinaciones entre los factores y sus respectivos niveles. En este caso particular, se emplea un diseño con cuatro factores y dos niveles por factor, realizando tres réplicas para cada combinación, y el experimento se lleva a cabo de manera aleatoria.

Se presenta el diseño experimental detallado con las distintas corridas, especificando las variables de entrada. En este caso, C5 representa el área de entrada de hidrógeno desde la admisión y C6 las revoluciones del motor, con un total de 8 corridas base.

### Figura 2.4

#### *Resumen del diseño experimental*

#### Resumen del diseño

Factores:	2	Réplicas:	3
Corridas base:	8	Total de corridas:	24
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Número de niveles: 4, 2

*Nota:* En la presente imagen se observa el diseño experimental propuesto. Fuente: Autores

**Figura 2.5**

*Orden del diseño experimental para la obtención de muestras*

	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Porcentaje de hidrógeno	RPM
1	24	1	1	1	4	2
2	16	2	1	1	4	2
3	3	3	1	1	2	1
4	21	4	1	1	3	1
5	14	5	1	1	3	2
6	7	6	1	1	4	1
7	23	7	1	1	4	1
8	5	8	1	1	3	1
9	19	9	1	1	2	1
10	20	10	1	1	2	2
11	18	11	1	1	1	2
12	13	12	1	1	3	1
13	22	13	1	1	3	2
14	1	14	1	1	1	1
15	6	15	1	1	3	2
16	12	16	1	1	2	2
17	15	17	1	1	4	1
18	9	18	1	1	1	1
19	2	19	1	1	1	2
20	17	20	1	1	1	1
21	10	21	1	1	1	2
22	8	22	1	1	4	2
23	11	23	1	1	2	1
24	4	24	1	1	2	2

*Nota:* En la presente imagen se observa el diseño experimental y número de pruebas a realizar.

Fuente: Autores

### **2.3 RECONOCIMIENTO DEL PROBLEMA**

Se agregarán diferentes porcentajes de hidrógeno al motor diésel tanto en ralentí como a 2500 RPM y se tomarán muestras para analizar cómo esto afecta la opacidad y las emisiones, determinando cuál de las variables de salida es la más representativa.

## 2.4 VARIABLES DE RESPUESTA

Estas variables son las que se van a analizar para identificar cuál porcentaje de suministración de hidrógeno es favorable y representativa en la opacidad y emisiones del motor diésel, las variables consideradas son el valor K (coeficiente de opacidad), la concentración de partículas, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y los NOx (óxidos de nitrógeno). Cada una de estas variables se presentará junto con sus respectivas magnitudes y unidades de medida.

## 2.5 VARIABLES CONTROLABLES

Estas variables serán ajustadas según los requerimientos del estudio y el diseño del experimento y se les conoce como factores los cuales tendrán diferentes niveles e influirán en las variables de respuesta.

## 2.6 FACTORES Y NIVELES

Los factores se presentan en la tabla 2.1, junto con sus niveles respectivos, los cuales serán ajustados de manera controlada según lo indique cada muestra, con el objetivo de analizar el comportamiento de la variable de respuesta.

**Tabla 2.1**

*Factores y Niveles del diseño de experimento*

<b>Variables</b>	<b>Niveles</b>				<b>Unidad</b>
Porcentaje de hidrógeno en la entrada de aire en la admisión	Máximo 75	Medio 50	Mínimo 25	Nulo 0	%
Revoluciones del motor	Ralentí 800	Carga máxima 2500		RPM	

## 2.7 PORCENTAJES DE HIDRÓGENO INGRESADO EN LA ADMISIÓN

La admisión es el conjunto de componentes que suministran al motor aire limpio a una velocidad y temperatura adecuadas según las necesidades del régimen del motor. El aire pasa a través de un filtro, por el cual se introduce el hidrógeno mediante el generador, ajustado a los porcentajes deseados.

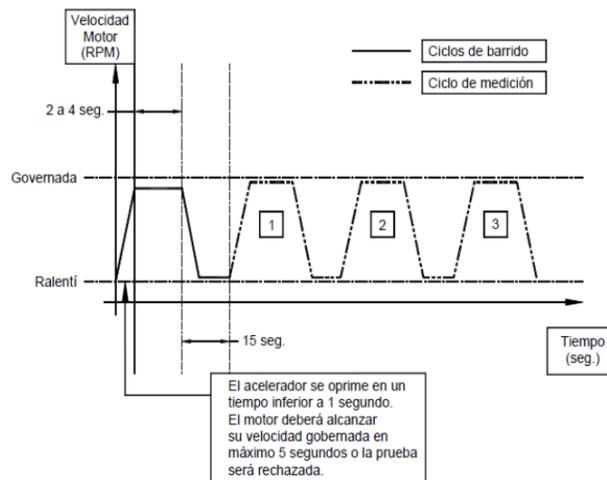
- Nivel máximo 75% de hidrógeno (4)
- Nivel medio 50 % de hidrógeno (3)
- Nivel mínimo 25 % (2)
- Nivel nulo 0% (1)

## 2.8 RÉGIMEN DE GIRO DEL MOTOR

Basados en la normativa (INEN 2202, 2013)'GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA OPACIDAD DE EMISIONES DE ESCAPE DE MOTORES DE DIESEL MEDIANTE LA PRUEBA ESTÁTICA. MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE'' se determinaron los niveles de la siguiente forma:

**Figura 2.6**

*Ciclos de aceleración libre*



*Nota:* En la presente imagen se observa los ciclos de aceleración, *Fuente:* (INEN 2202, 2013)

- Nivel bajo: Ralentí 800 RPM
- Nivel alto: Carga máxima 2500 RPM

A continuación, en la figura se presenta el ingreso del hidrógeno en la admisión.

**Figura 2.7**

*Ingreso del hidrógeno en la admisión*



*Nota:* Se observa en la presente imagen el ingreso de hidrógeno en la admisión. *Fuente:* Autores

## **2.9 VARIABLES DE BLOQUEO**

Es una variabilidad impredecible que provoca que al realizar múltiples mediciones de un mismo objeto las medidas no sean idénticas sin embargo a pesar de este caos aparente existe un patrón regular en las fluctuaciones con las medidas tendiendo a concentrarse alrededor de un valor central lo cual es importante estimar mediante un modelo de probabilidad. (Panamito, 2015)

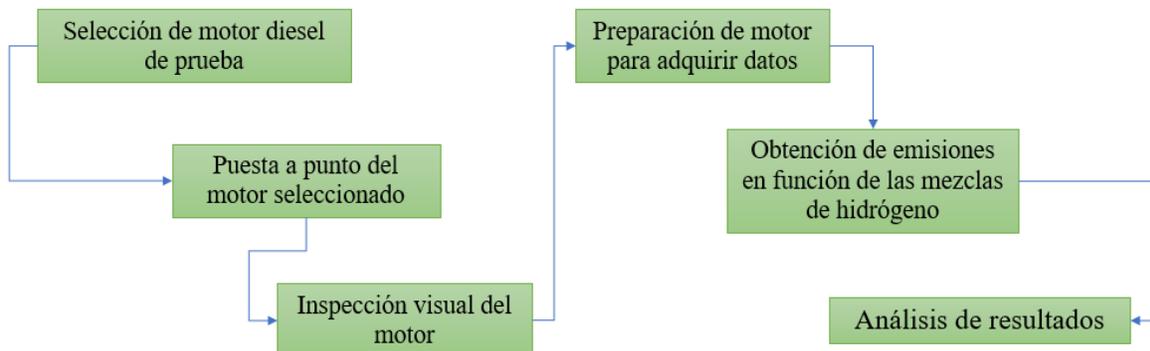
**Tabla 2.2**

*Variables de bloqueo en el diseño de experimento. Fuente: (Panamito, 2015)*

<b>Factores</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura del aceite	97 – 105	°C
Carga externa del motor	0	%
Temperatura del aire	28,67 – 30,45	°C
Humedad relativa	68,54 – 75,59	%

**Figura 2.8**

*Flujograma de la metodología utilizada para adquirir datos*



*Nota:* En la imagen se detalla un flujograma con las actividades a realizar para la adquisición de datos. Fuente: Autores

## 2.10 SELECCIÓN DE MOTOR DE PRUEBA - HYUNDAI PORTER MODELO G-130301

Dispone de un motor diésel de 2.5 litros y cuatro cilindros en línea, especialmente diseñado para cumplir con los requerimientos de vehículos de carga semipesados.

Este motor ofrece una combinación de durabilidad y eficiencia en el rendimiento, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones comerciales e industriales. Gracias a su diseño robusto, el H100 proporciona una potencia confiable que permite transportar cargas de manera efectiva, manteniendo un consumo de combustible moderado que beneficia tanto a empresas como a operadores independientes.

Además, este modelo destaca por su versatilidad en distintos entornos, desde operaciones urbanas hasta rutas más exigentes, consolidándose como una herramienta clave para negocios que requieren transporte eficiente y económico. Su motor está optimizado para ofrecer un buen balance entre fuerza y eficiencia, permitiendo un desempeño adecuado incluso bajo condiciones de trabajo intensivas, su año de fabricación fue en el 2000. (motoresdyg, 2022)

### **Figura 2.9**

*Motor Hyundai Porter*



*Nota:* Motor Hyundai Porter seleccionado para pruebas. Fuente: Autores.

## 2.11 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR SELECCIONADO

En esta sección se exponen las especificaciones técnicas del motor elegido, el Hyundai Porter. Estas características abarcan detalles sobre el motor y otros aspectos importantes que son esenciales para entender su rendimiento en las pruebas realizadas. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas del motor:

**Tabla 2.3**

*Especificaciones técnicas del motor*

<b>Elemento</b>	<b>Estado</b>
Cilindrada	2497 cc
Relación de compresión	16,4:1
Potencia máxima	83 hp @ 4000 rpm
Torque máximo	226 Nm @ 2200 rpm
Sistema de enfriamiento	Líquido por radiador
Sistema de lubricación	Forzada por bomba de aceite
Peso del motor	200 kg

*Nota:* En la tabla se presentan las especificaciones técnicas del motor Hyundai Porter. Recuperación de datos de (Salinas, 2023).

## 2.12 PUESTA A PUNTO DEL MOTOR

La puesta a punto de un motor diésel consiste en realizar una serie de ajustes, inspecciones y mantenimiento técnico para garantizar que el motor funcione de manera eficiente, con un rendimiento óptimo y dentro de los parámetros establecidos por el fabricante.

A continuación, se detallan los pasos principales en la puesta a punto de un motor diésel:

- **Limpieza de inyectores:** Eliminar depósitos de carbono y residuos que puedan afectar el flujo de combustible.
- **Inspección de la bomba de inyección:** Verificar su estado, calibrar la presión de suministro y ajustar el sincronismo con el cigüeñal.
- **Limpieza del sistema de admisión:** Quitar obstrucciones y depósitos de carbón en colectores y válvulas.
- **Control de la compresión:** Verificar que cada cilindro tenga la presión adecuada mediante un medidor de compresión.
- **Sincronización del motor:** Ajustar el ángulo de inyección para que coincida con el ciclo de compresión del motor.

### Figura 2.10

*Medición de compresión motor diésel*



*Nota:* Compresión de 300 psi aproximadamente en general de los cilindros del motor diésel. Fuente

Autores

### 2.13 Inspección visual del motor

Comprobar el estado de los siguientes componentes del motor:

- Mangueras

## Figura 2.11

*Mangueras y cañerías de alta presión*



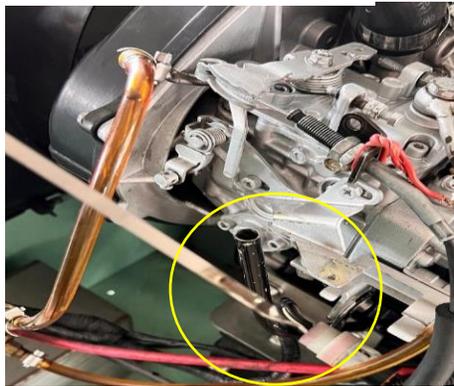
*Nota:* Revisión de las mangueras y tuberías de alta presión de combustible ubicadas en el motor.

Fuente: Autores

- Aceite del motor

## Figura 2.12

*Cambio de aceite del motor*



*Nota:* En la imagen se observa la varilla del nivel de aceite correcto. Fuente: Autores

- Filtros

### **Figura 2.13**

*Inspección visual de filtro de aceite del motor. Fuente: Autores*



*Nota:* En la imagen se observa el filtro de aceite del motor al momento de efectuar su inspección, el cual no presentaba fugas de lubricante, ni deterioros en su estructura. Fuente: Autores

### **2.14 PROCESO DE PREPARACIÓN DEL MOTOR**

La preparación del motor es un paso clave para asegurar que las pruebas de emisiones contaminantes con el suministro de hidrógeno se realicen de forma segura y eficiente. Este proceso abarca la adaptación del sistema de admisión para incorporar el hidrógeno como complemento al aire de combustión, así como la calibración precisa de los equipos de medición requeridos para monitorear las emisiones y el rendimiento del motor.

- Ajustar el sistema de admisión para permitir la mezcla de aire con hidrógeno.
- Verificar la calibración de los sensores y equipos de medición.
- Optimizar la compresión del aire para maximizar la eficiencia en la mezcla con hidrógeno.
- Realizar pruebas de seguridad para garantizar la integridad de los sistemas bajo las nuevas condiciones operativas.

El ajuste del sistema de admisión asegura que la mezcla de aire e hidrógeno sea homogénea y estable, lo que permite un funcionamiento controlado del motor bajo diferentes condiciones experimentales.

La revisión y calibración de los sensores, tales como los analizadores de gases y los medidores de flujo, es esencial para obtener datos confiables y precisos, fundamentales para evaluar el impacto ambiental y la eficiencia del sistema.

### **Figura 2.14**

*Conexión de sonda al conducto de escape*



*Nota:* En la imagen actual se lleva a cabo la preparación y conexión de los equipos de medición para la recopilación de datos. Fuente: Autores

## **2.15 CONDICIONES AMBIENTALES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS**

La medición de emisiones en motores diésel requiere la consideración cuidadosa de las condiciones ambientales, ya que estas influyen significativamente en el comportamiento del motor, la combustión del combustible y, por ende, en las emisiones

generadas. Factores como la temperatura ambiental, la presión atmosférica y la humedad relativa pueden influir en la densidad del aire y en la eficiencia del proceso de combustión, lo que impacta la cantidad y la composición de los gases emitidos.

Además, la normalización de las condiciones ambientales permite que los resultados sean reproducibles y comparables con otros estudios similares, contribuyendo al desarrollo de soluciones más sostenibles y eficientes para la reducción de emisiones contaminantes.

Las condiciones ambientales para la evaluación de generadores de hidrógeno en Cuenca, Ecuador, están definidas por factores específicos que impactan directamente en el rendimiento de estos sistemas. La altitud de la ciudad, situada a unos 2,560 metros sobre el nivel del mar, provoca una disminución en la presión atmosférica, lo que afecta la densidad del aire y la eficiencia de los motores. Este fenómeno requiere que los generadores operen con configuraciones optimizadas para mantener un suministro constante y eficiente de hidrógeno bajo condiciones de baja presión.

A continuación, se evidencian las condiciones ambientales para la toma de datos en el motor:

**Tabla 2.4**

*Condiciones externas – Cuenca, Ecuador*

<b>Factor</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura ambiente	20 - 30	°C
Humedad relativa	70	%

---

Presión atmosférica	1017	hPa
---------------------	------	-----

---

Nota: En la tabla se expresan las condiciones ambientales con sus respectivas unidades de medida a la hora de la toma de datos y pruebas en el motor. Fuente: (EMOV, 2022)

## **2.16 OBTENCIÓN DE OPACIDAD EN FUNCIÓN DE LAS MEZCLAS DE HIDRÓGENO**

La opacidad de los gases de escape es un indicador clave para evaluar la eficiencia de combustión y el nivel de emisiones contaminantes en motores diésel. La adición de hidrógeno a la mezcla de combustible puede influir significativamente en este parámetro, debido a las propiedades del hidrógeno, como su alta velocidad de llama y su capacidad para mejorar la homogeneidad de la combustión.

En este apartado se examina la relación entre las proporciones de hidrógeno y diésel y la opacidad de los gases de escape, lo que permite evaluar el impacto de estas mezclas en la reducción de las emisiones de partículas y en el desempeño ambiental del motor.

- 0% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.15**

*Prueba Opacidad 1 (Ralentí)*



Nota: Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando netamente con diésel en ralentí.

El coeficiente de absorción óptica ( $k = 0.039 /m$ ), que mide la densidad del humo, es bajo. Esto indica que las emisiones visibles de partículas son mínimas, lo cual sugiere que el motor está operando de manera eficiente y que el sistema de inyección y combustión está en buen estado.

El nivel de partículas en suspensión ( $P = 8.27 mg$ ) también es moderado. Esto refleja que, aunque se generan partículas durante la combustión, la cantidad se mantiene dentro de parámetros aceptables. La velocidad del motor durante la prueba ( $n = 833 r/min$ ) indica que el análisis se realizó en ralentí, un régimen operativo estándar para establecer una línea base de comparación.

- 0% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.16**

*Prueba Opacidad 1 (2500 rpm)*



Nota: Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando netamente con diésel a 2500 rpm.

Fuente: Autores

La opacidad medida con el motor funcionando a 2500 rpm aproximadamente es ( $k = 3.768/m$ ), lo que indica que el motor produce un nivel elevado de emisiones visibles, común en motores diésel que no cuentan con sistemas avanzados de tratamiento de gases. Mientras que el nivel de partículas en suspensión también aumenta considerablemente cuando el motor trabaja a este nivel de rpm.

- 25% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.17**

*Prueba Opacidad 2 (Ralentí)*



Nota: Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (25% y 75% respectivamente) en ralentí. Fuente: Autores

En esta imagen se observa que la opacidad medida cuando se suministra una mezcla de 25% de hidrógeno y 75% de diésel es ( $k = 0.028/m$ ) mientras el motor se encuentra funcionando en estado de ralentí.

- 25% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.18**

*Prueba Opacidad 2 (2500 rpm)*



*Nota:* Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (25% y 75% respectivamente) a 2500 rpm. Fuente: Autores

En esta imagen se observa que en función del aumento de rpm en el funcionamiento del motor existe una elevación del factor ( $k = 2.331/m$ ), sin embargo, presenta una disminución de este frente al funcionamiento del motor solo con diésel.

- 50% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.19**

*Prueba Opacidad 3 (Ralentí)*



*Nota:* Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (50% y 50% respectivamente) en ralentí. Fuente: Autores

En la imagen se presenta una medición realizada con un "MAHA Emission Tester" durante el funcionamiento de un motor diésel utilizando una mezcla de 50% hidrógeno y 50% diésel a ralentí (800 rpm).

Los resultados indican valores de 5.112 mg de partículas (P) y un coeficiente de opacidad (k) de 0.024/m, evidenciando una notable reducción en las emisiones contaminantes.

- 50% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.20**

*Prueba Opacidad 3 (2500 rpm)*



*Nota:* Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (50% y 50% respectivamente) a 2500 rpm. Fuente: Autores

El coeficiente de opacidad refleja una alta densidad de humo en los gases de escape, aunque la adición de hidrógeno a la mezcla debería haber disminuido las emisiones de hollín en comparación con el uso exclusivo de diésel.

- 75% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.21**

*Prueba Opacidad 4 (Ralentí)*



*Nota:* Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (75% y 25% respectivamente) en ralentí. Fuente: Autores

Se observa (fig.2.21) una medición de emisiones realizada con un motor diésel funcionando con una mezcla de 75% hidrógeno y 25% diésel a ralentí (768 rpm). Los valores registrados son 4.169 mg de partículas (P) y un coeficiente de opacidad (k) de 0.020/m, mostrando una clara disminución de las emisiones contaminantes en comparación con mezclas anteriores y con el uso exclusivo de diésel.

- 75% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.22**

*Prueba Opacidad 4 (2500 rpm)*



*Nota:* Datos del opacímetro cuando el motor está trabajando con una mezcla hidrógeno-diésel (75% y 25% respectivamente) a 2500 rpm. Fuente: Autores

Los resultados muestran que, aunque el rendimiento de la mezcla se ve afectado en regímenes de alta velocidad, la incorporación de hidrógeno sigue siendo beneficiosa para reducir las emisiones contaminantes. Esto sugiere que el uso de hidrógeno es más efectivo en condiciones de baja carga o ralentí, y podrían explorarse estrategias adicionales para optimizar la combustión en altas revoluciones.

## 2.17 OPACIDAD DE LAS MUESTRAS MEDIANTE EL FACTOR K

El valor de las muestras tomadas fue interpretado con base a la tabla de valores de la ficha técnica del opacímetro, para determinar la opacidad se aplicó la siguiente formula:

$$K = ( 1 / d ) x \ln ( lo / ( lo - lx ) )$$

Donde:

- $d$  = Longitud de la cámara de medición en metros.
- $lo$  = Intensidad de luz emitida en %.
- $lx$  = Luz absorbida por las partículas del gas en suspensión en %.
- La longitud de la cámara viene dictada por cada fabricante. En nuestro opacímetro es de 0,430 metros.
- La  $lo$  es de 100 %

Los valores que nos fijan las reglamentaciones son de  $K = 2,5$  (1/m) para vehículos atmosféricos. De aquí podemos deducir que para el valor de  $K = 2,5$  (1/m) nos equivale a la medición antigua de 65 %. (MAHA)

$$K = ( 1 / 0,430 ) x \ln ( 100 / ( 100 - 65 ) )$$

$$K = 2,5 ( 1 / m )$$

**Figura 2.23**

*Valores de la opacidad*

KWERT\_03.XLS

<b>Zusammenhang zwischen k-Wert und Trübung</b>				
k (1/m)	Trübung (%)		k (1/m)	Trübung (%)
0,1	4,21		5,6	91,00
0,2	8,24		5,7	91,38
0,3	12,10		5,8	91,74
0,4	15,80		5,9	92,09
0,5	19,35		6	92,42
0,6	22,74		6,1	92,74
0,7	25,99		6,2	93,05
0,8	29,11		6,3	93,34
0,9	32,09		6,4	93,62
1	34,95		6,5	93,89
1,1	37,69		6,6	94,15
1,2	40,31		6,7	94,39
1,3	42,82		6,8	94,63
1,4	45,23		6,9	94,85
1,5	47,53		7	95,07
1,6	49,74		7,1	95,28
1,7	51,86		7,2	95,48
1,8	53,88		7,3	95,67
1,9	55,82		7,4	95,85
2	57,68		7,5	96,02
2,1	59,46		7,6	96,19
2,2	61,17		7,7	96,35
2,3	62,81		7,8	96,51
2,4	64,37		7,9	96,65
2,5	65,87		8	96,79
2,6	67,31		8,1	96,93
2,7	68,68		8,2	97,06
2,8	70,00		8,3	97,18
2,9	71,26		8,4	97,30
3	72,47		8,5	97,41
3,1	73,63		8,6	97,52
3,2	74,74		8,7	97,63
3,3	75,80		8,8	97,73
3,4	76,82		8,9	97,82
3,5	77,80		9	97,91
3,6	78,73		9,1	98,00
3,7	79,63		9,2	98,09
3,8	80,49		9,3	98,17
3,9	81,31		9,4	98,24
4	82,09		9,5	98,32
4,1	82,85		9,6	98,39
4,2	83,57		9,7	98,46
4,3	84,26		9,8	98,52
4,4	84,92		9,9	98,58
4,5	85,56		10	98,64
4,6	86,17		10,1	98,70
4,7	86,75		10,2	98,75
4,8	87,31		10,3	98,81
4,9	87,84		10,4	98,86
5	88,35		10,5	98,91
5,1	88,84		10,6	98,95
5,2	89,31		10,7	99,00
5,3	89,76		10,8	99,04
5,4	90,19			
5,5	90,61			

*Nota:* Tabla de valores de la opacidad mediante el factor k. Fuente: (MAHA)

**Tabla 2.5***Porcentajes de opacidad*

<b>Porcentaje de</b>				
<b>Hidrógeno (%)</b>	<b>RPM</b>	<b>Material particulado (mg)</b>	<b>Factor (K) 1/m</b>	<b>Opacidad %</b>
0	800	8.271	0.039	12.10
0	2500	1.521	3.768	79.63
25	800	5.904	0.028	8.24
25	2500	920.5	2.331	62.81
50	800	5.112	0.024	8.24
50	2500	845.7	2.152	59.46
75	800	4.169	0.020	8.24
75	2500	805.9	2.057	57.68

*Nota:* Límites máximos de opacidad en las emisiones para vehículos con motor diésel (prueba de aceleración libre). Fuente: Autores

**Figura 2.24***Límites de valores de la opacidad*

<b>Año modelo</b>	<b>% Opacidad</b>
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

*Nota:* Límites de valores de la opacidad. Fuente: (INEN 2207, 2002)

## 2.18 OBTENCIÓN DE EMISIONES EN FUNCIÓN DE LAS MEZCLAS DE HIDRÓGENO

El objetivo es evaluar cómo las mezclas de hidrógeno y diésel, así como el uso exclusivo de hidrógeno, afectan la generación de partículas y la densidad del humo visible en distintas condiciones de operación del motor.

Los resultados obtenidos son clave para evaluar la efectividad de las mezclas en la reducción de emisiones contaminantes, particularmente en condiciones de ralentí y a altas revoluciones (2500 rpm).

Este análisis ofrece una base firme para la adopción de combustibles alternativos en vehículos y maquinaria, ayudando a reducir los efectos del cambio climático y a mejorar la calidad del aire.

- **0% de hidrógeno – Ralentí**

**Figura 2.25**

*Prueba Emisiones 1 (Ralentí)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando únicamente con diésel en ralentí. Fuente: Autores

La imagen muestra los parámetros iniciales de las emisiones de un motor diésel operando únicamente con diésel como combustible en condiciones de ralentí.

- 0% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.26**

*Prueba Emisiones 1 (2500 rpm)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando únicamente con diésel a 2500 rpm. Fuente: Autores

En la siguiente imagen (Fig. 2.26) se observan las emisiones iniciales del motor diésel funcionando exclusivamente con diésel como combustible en condiciones de operación, aproximadamente a 2500 rpm.

- 25% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.27**

*Prueba Emisiones 2 (Ralentí)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 25% de hidrógeno. Fuente: Autores

El valor de CO<sub>2</sub> mostrado es 2.3%. Esto indica una concentración relativamente baja de dióxido de carbono en los gases de escape, lo cual puede ser un efecto de la mezcla de hidrógeno (25%) y diésel (75%). Mientras que el valor de NO<sub>x</sub> es 120 ppm.

- 25% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.28**

*Prueba Emisiones 2 (2500 rpm). Fuente: Autores*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 25% de hidrógeno a 2500 rpm. Fuente: Autores

La reducción en las emisiones de NO<sub>x</sub> a 2500 rpm puede ser un factor limitante para la implementación de esta mezcla en términos ambientales. Sería necesario evaluar estrategias para mitigar estas emisiones.

- 50% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.29**

*Prueba Emisiones 3 (Ralentí)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 50% de hidrógeno a ralentí. Fuente: Autores

El motor está generando 2.1% de CO<sub>2</sub>, lo que sugiere una combustión razonablemente eficiente, pero con un margen para optimizar la relación aire-combustible y reducir más las emisiones de dióxido de carbono.

El nivel de NO<sub>x</sub> de 109 ppm es relativamente alto, lo que podría ser un indicio de un exceso de oxígeno en la mezcla, lo que genera temperaturas más altas durante la combustión y, por lo tanto, favorece la formación de NO<sub>x</sub>. Estos valores sugieren que una mejora en el ajuste del AFR podría equilibrar mejor las emisiones y optimizar la eficiencia del motor.

- 50% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.30**

*Prueba Emisiones 3 (2500 rpm)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 50% de hidrógeno a 2500 rpm. Fuente: Autores

El motor presenta un valor de CO<sub>2</sub> de 2.6%, lo que indica una reducción moderada en las emisiones de dióxido de carbono. Esta disminución podría estar relacionada con una mejora en la eficiencia de la combustión, posiblemente debido a una relación aire-combustible más optimizada. Además, el nivel de NO<sub>x</sub> es de 45 ppm, según el indicador en la pantalla. Este nivel de óxidos de nitrógeno puede ser resultado de un control adecuado de la mezcla de aire y combustible, evitando temperaturas de combustión excesivas y, por lo tanto, limitando la formación de NO<sub>x</sub>. Esto probablemente se deba a la mezcla pobre característica (alto factor de exceso de aire,  $\lambda$ , y relación aire-combustible, que favorece una combustión más eficiente y limpia, reduciendo la producción de óxidos de nitrógeno.

- 75% de hidrógeno – Ralentí

**Figura 2.31**

*Prueba Emisiones 4 (Ralentí)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 75% de hidrógeno. Fuente: Autores

El motor genera un valor de CO<sub>2</sub> de 1.9%, lo cual refleja una significativa reducción en las emisiones del CO<sub>2</sub> debido al predominio del hidrógeno en la combustión. Además, el valor de NOx se asume como 104 ppm, según el indicador mostrado en la pantalla. Este nivel de óxidos de nitrógeno puede atribuirse al exceso de oxígeno.

- 75% de hidrógeno – 2500 rpm

**Figura 2.32**

*Prueba Emisiones 4 (2500 rpm)*



*Nota:* Emisiones de partida con el motor funcionando con 75% de hidrógeno a 2500 rpm. Fuente: Autores

Con el motor operando a 2500 rpm, las emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzan el 2.4%, lo que indica un aumento en la combustión de combustible debido a las mayores revoluciones. El valor de NO<sub>x</sub> es de 41 ppm, lo que muestra una disminución en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en comparación con las condiciones anteriores, posiblemente gracias a una mejora en la eficiencia de combustión a esta velocidad del motor. Esto sugiere que la mezcla aire-combustible podría estar optimizada en esta condición, lo que reduce la formación de NO<sub>x</sub>, que es sensible a las temperaturas de combustión.

## 2.19 EMISIONES GENERADAS

La norma Técnica Ecuatoriana INEN 2207:2002 de límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diésel. Establece los límites de tolerancia

permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres de diésel para:

- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (THC)
- Óxidos de nitrógeno (NOx)
- Partículas (PM)

**Figura 2.33**

*Límites máximos de emisiones*

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso del vehículo cargado kg	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	Partículas g/km	CICLOS DE PRUEBA
Vehículos Livianos	Todos	Todos	2,10	0,25	0,62	0,12	FTP - 75
Vehículos Medianos	≤ 3 860	≤ 1 700	6,2	0,5	0,75	0,16	
		> 1 700 ≤ 3 860	6,2	0,5	1,1	0,28	
Vehículos Pesados**	> 3 860	Todos	15,5	1,3	5,0	0,10***	Transiente pesado
* prueba realizada a nivel del mar ** en g/bHP-h (gramos / brake Horse Power-hora) *** para buses urbanos el valor es 0,07 g/bHP-h							

*Nota:* Limite de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de diésel (prueba dinámica) a partir del año modelo 2000 (ciclos americanos). (INEN 2207, 2002)

**Tabla 2.6***Valores de las emisiones obtenidas en las pruebas*

<b>Porcentaje de Hidrógeno (%)</b>	<b>RPM</b>	<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) %</b>	<b>Óxidos de nitrógeno (NOx) ppm</b>	<b>Lambda (λ)</b>	<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>) %</b>	<b>Monóxido de Carbono (CO %)</b>
0	800	2.5	130	2.0	16.60	0.02
0	2500	3.1	53	2.0	15.96	0.03
25	800	2.3	120	2.0	16.65	0.02
25	2500	2.8	29	2.0	15.79	0.07
50	800	2.1	109	2.0	16.71	0.02
50	2500	2.6	45	2.0	17.01	0.03
75	800	1.9	104	2.0	16.92	0.01
75	2500	2.4	41	2.0	16.52	0.02

*Nota:* En la tabla se evidencian las emisiones generadas por el motor Hyundai Porter. Fuente:

Autores

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE LA OPACIDAD Y EMISIONES GENERADAS CONFORME A LAS MUESTRAS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS**

En este capítulo se presenta el análisis detallado de las mediciones de opacidad y las emisiones generadas durante las pruebas realizadas en un motor diésel atmosférico. El objetivo principal es analizar y comparar la relación entre las condiciones operativas del motor y la calidad de las emisiones, enfocándose particularmente en cómo los diferentes porcentajes de hidrógeno en la mezcla de combustible y las variaciones en las revoluciones por minuto (RPM) del motor impactan la opacidad y las emisiones contaminantes. Además, se realiza una validación exhaustiva de los datos obtenidos a través del diseño experimental previamente definido, con el fin de asegurar la confiabilidad de los resultados.

#### **3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO**

El diseño experimental se estructuró para investigar cómo varían la opacidad y las emisiones generadas en el motor bajo diversas condiciones operativas. Se tomaron en cuenta dos factores clave en este análisis: los porcentajes de hidrógeno ingresados a la mezcla de combustible e incrementos en las RPM del motor.

Se establecieron varios puntos experimentales donde se combinaban diferentes concentraciones de hidrógeno (0%,25%, 50%,75% de hidrógeno) y un rango de RPM que iba desde ralentí hasta las 2500 revoluciones por minuto.

### **3.2 MEDICIONES DE OPACIDAD**

La opacidad de los gases de escape es un indicador clave para evaluar la cantidad de partículas no quemadas presentes en los gases emitidos por el motor. Esta medición ofrece datos sobre la calidad de la combustión y el grado de contaminación generado. Las mediciones de opacidad se llevaron a cabo utilizando un opacímetro, un dispositivo que mide la capacidad de los gases de escape para absorber luz, generando un valor que refleja la densidad de las partículas suspendidas.

Los resultados mostraron que, a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla de combustible aumentaba, la opacidad tendía a reducirse. Esto se debe a que el hidrógeno mejora la combustión en motores diésel, favoreciendo una quema más completa del combustible y, por lo tanto, generando menos material particulado. En particular, cuando se emplearon mezclas con un 75% de hidrógeno, la opacidad se redujo considerablemente en comparación con el uso exclusivo de diésel.

### **3.3 MATERIAL PARTICULADO (PM)**

La formación de material particulado disminuyó considerablemente con la adición de hidrógeno, ya que este componente favorece una combustión más eficiente. En particular, las mezclas con 75% de hidrógeno mostraron los niveles más bajos de PM, lo que coincide con los resultados de opacidad, donde también se observó una reducción significativa en la densidad de partículas. Sin embargo, a medida que las RPM aumentaban, la cantidad de material particulado aumentaba ligeramente, especialmente en las mezclas con menores concentraciones de hidrógeno.

### **3.4 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES**

Además de la opacidad, se evaluaron otras emisiones contaminantes como el CO, CO<sub>2</sub>, Lambda ( $\lambda$ ), O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>. La incorporación de hidrógeno en la mezcla de combustible mostró efectos significativos sobre las emisiones, principalmente en la reducción de CO y NO<sub>x</sub>, que son dos de los principales contaminantes generados por los motores diésel.

### **3.5 EMISIONES DE CO (MONÓXIDO DE CARBONO)**

Los valores mostraron una variabilidad interesante en función de las condiciones operativas del motor. En general, los valores de CO fueron bajos, lo que indica que la combustión del diésel, incluso con porcentajes de hidrógeno, fue relativamente eficiente. Sin embargo, hubo un valor elevado de 0.07 en una medición en particular, que podría estar relacionado con una condición de operación subóptima o un cambio temporal en el régimen de combustión debido a la suministración del hidrógeno.

### **3.6 EMISIONES DE CO<sub>2</sub> (DIÓXIDO DE CARBONO)**

Las emisiones de CO<sub>2</sub>, como se esperaba, fueron directamente proporcionales a la cantidad de combustible quemado. Sin embargo, se observó que, en las mezclas con hidrógeno, la eficiencia energética mejoraba levemente, lo que resultaba en una ligera disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Este comportamiento fue más evidente cuando el motor operaba a RPM altas, donde la mezcla de hidrógeno optimizaba la combustión.

### **3.7 LAMBDA ( $\lambda$ )**

Es importante destacar que, en todo momento, la relación aire-combustible ( $\lambda$ ) se mantuvo constante en 2,000, lo cual favorece una combustión más completa y reduce la formación de CO. La tendencia general observada es que las emisiones de CO

disminuyeron conforme aumentaba el porcentaje de hidrógeno en la mezcla de combustible. Esto es esperado, ya que el hidrógeno facilita una combustión más eficiente, reduciendo los productos incompletos de la combustión como el CO.

### **3.8 MEDICIONES DE OXÍGENO (O<sub>2</sub>)**

Los resultados muestran una ligera variabilidad en los valores de oxígeno residual, con un rango que va desde 15.79% hasta 17.01%. Estos valores indican que, a pesar de las fluctuaciones, el motor estuvo operando en un régimen de mezcla pobre ( $\lambda = 2,000$ ), lo que implica que había suficiente oxígeno para la combustión, pero no en exceso, lo que favorece la reducción de las emisiones de gases contaminantes como el CO y los NOx.

### **3.9 EMISIONES DE NOX (ÓXIDOS DE NITRÓGENO)**

Los NOx se producen principalmente debido a las altas temperaturas y presiones durante la combustión. Las emisiones de NOx experimentaron una disminución notable al incrementar el porcentaje de hidrógeno en la mezcla de combustible. Esto ocurre porque el hidrógeno actúa como regulador de la temperatura de combustión, reduciendo la formación de óxidos de nitrógeno. No obstante, a revoluciones más altas, aunque se observó una reducción de NOx, las variaciones fueron menos pronunciadas en comparación con las mediciones realizadas a bajas revoluciones.

### **3.10 VALIDACIÓN DE LOS DATOS**

Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos, los datos fueron validados mediante un proceso de comparación con estudios previos y normas internacionales sobre emisiones de motores diésel. Los resultados de las mediciones de opacidad y emisiones de gases contaminantes fueron consistentes con las expectativas para

motores diésel modificados con hidrógeno, lo que validó la eficacia del diseño experimental y la precisión de las mediciones. Además, se realizaron análisis estadísticos para verificar la reproducibilidad de los resultados y se evaluaron posibles fuentes de error en las mediciones. La calibración de los equipos de medición y el control riguroso de las condiciones experimentales aseguraron la exactitud de los datos.

### **3.11 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

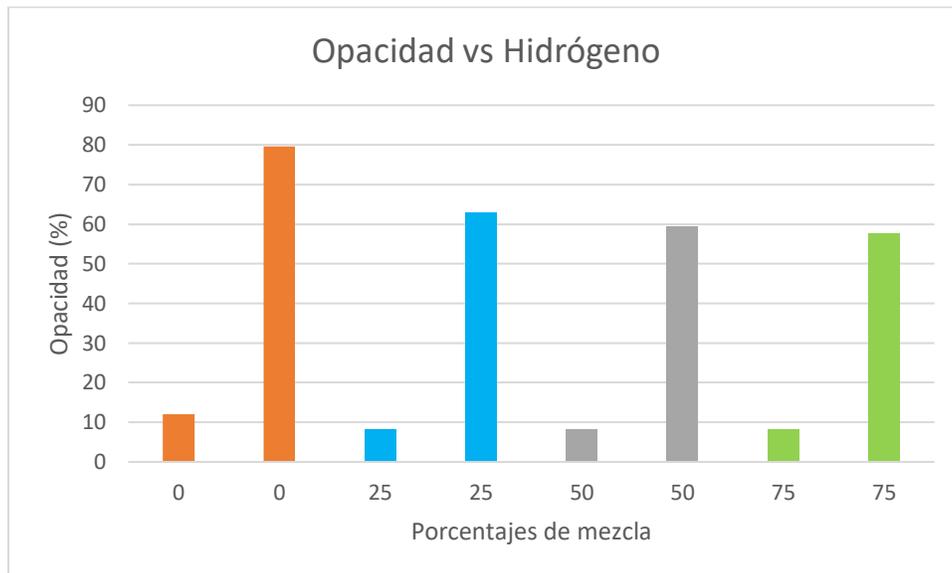
En este apartado se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos a partir de las gráficas generadas durante las pruebas, las cuales muestran los efectos de la incorporación de diferentes porcentajes de hidrógeno en la mezcla de combustible, en comparación con los resultados obtenidos cuando el motor operó exclusivamente con diésel. Este análisis se fundamenta en los datos recolectados durante las diversas pruebas realizadas, con el fin de examinar y evaluar cómo las variaciones en la composición de la mezcla de combustible y las condiciones operativas del motor afectan las emisiones.

Para este propósito, se presentarán las gráficas correspondientes a cada condición experimental utilizando un software de ingeniería (Matlab), las cuales mostrarán las emisiones de gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), material particulado (mg) y la opacidad de los gases de escape. Además, se compararán los resultados obtenidos bajo las condiciones con hidrógeno en la mezcla con aquellos obtenidos sin hidrógeno, con el propósito de identificar patrones, tendencias y diferencias significativas en el comportamiento del motor en cada escenario.

### 3.12 ANÁLISIS GRÁFICO DE LA OPACIDAD DEL MOTOR DIÉSEL

**Figura 3.1**

*Análisis de la opacidad*



Nota: Imagen de la Variación de la opacidad al suministrar hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica general se puede observar cómo varió y disminuyó la opacidad en el motor cuando se suministró hidrógeno a diferentes porcentajes, como referencia se comparamos el primer valor de 12.10 % a ralentí hasta 79.63 % a 2500 rpm, se puede evaluar según el límite de la norma (INEN 2207, 2002) que es muy alto el porcentaje de opacidad ya que el máximo valor de opacidad es del 50 % para motores diésel a partir del año 2000.

Al suministrar el 25% de hidrógeno se obtiene un valor de 8.24% de opacidad en ralentí y 62.81% a 2500 rpm, bajando considerablemente la opacidad en comparación con la primera medida, pero con un 12.81% fuera del límite máximo según lo permitido en este motor diésel.

Al suministrar el 50% de hidrógeno se obtiene un valor de 8.24% de opacidad en ralentí y 59.46% a 2500 rpm, bajando considerablemente la opacidad, estando con 9.46% por fuera del límite máximo permitido para este motor diésel.

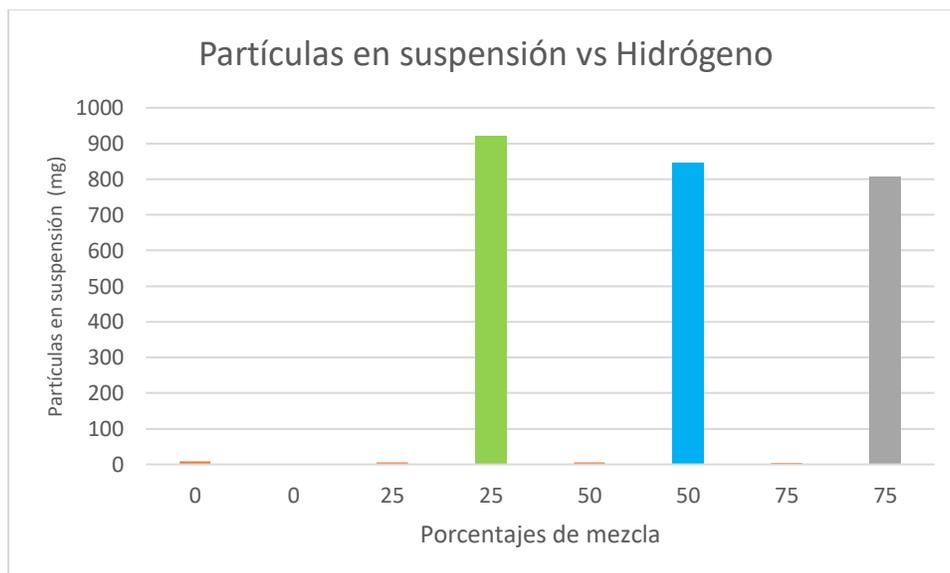
Al suministrar el 75 % de hidrógeno se obtiene un valor de 8.24% de opacidad en ralentí y 57.68% a 2500 rpm, bajando considerablemente la opacidad con referencia la primera medida, con un porcentaje de opacidad del 7.68% por debajo del límite máximo permitido para este motor diésel.

Por lo tanto, al suministrar hidrógeno al 75 % se pudo constatar (fig. 3.1) con respecto a la primera medida como referencia se redujo en un 21.95% la opacidad en este motor diésel atmosférico, pero está por encima del límite máximo según la norma (INEN 2207, 2002) que es del 50% para motores diésel a partir del año 2000.

### 3.13 ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

**Figura 3.2**

*Análisis de las partículas en suspensión*



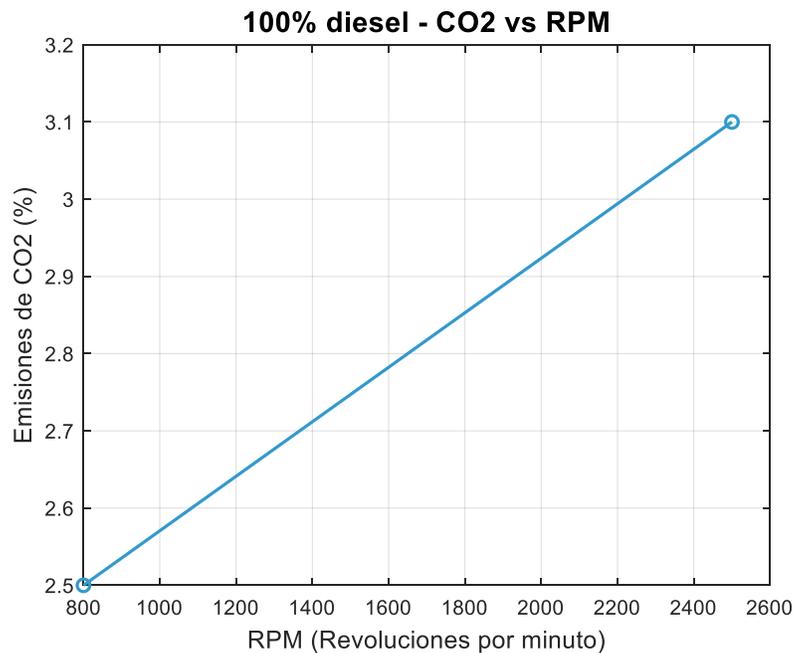
Nota: Imagen de la Variación de las partículas en suspensión al suministrar hidrógeno Fuente: Autores

Al incrementar el porcentaje de hidrógeno (tabla 2.5) en la mezcla (25%, 50%, y 75%), las emisiones de partículas aumentan drásticamente en las 2500 rpm, alcanzando valores cercanos a 900 mg en cada caso. Esto indica que la adición de hidrógeno, en estas proporciones, no mejora las emisiones y puede estar generando una combustión menos eficiente.

### 3.14 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO2 CON 0% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.3**

*Análisis de CO2 con 0% de hidrógeno*



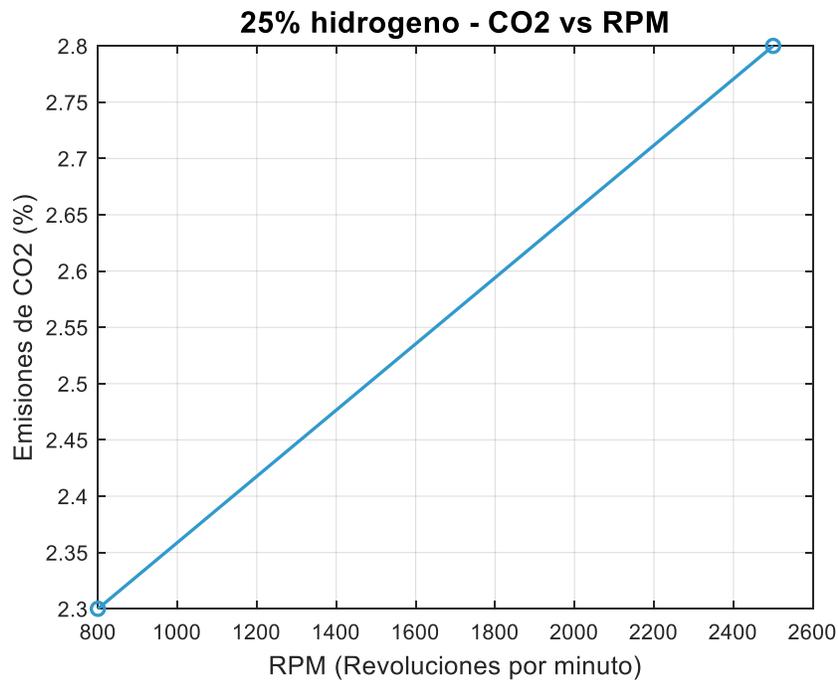
Nota: Imagen del CO2 sin hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.3) se observa la variación de CO<sub>2</sub> en % sin hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 2.5% hasta 3.1% a 2500 rpm, estos valores serian la referencia para la evaluación y comparación de los demás datos obtenidos.

### 3.15 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO<sub>2</sub> CON 25% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.4**

*Análisis de CO<sub>2</sub> con 25% de hidrógeno*



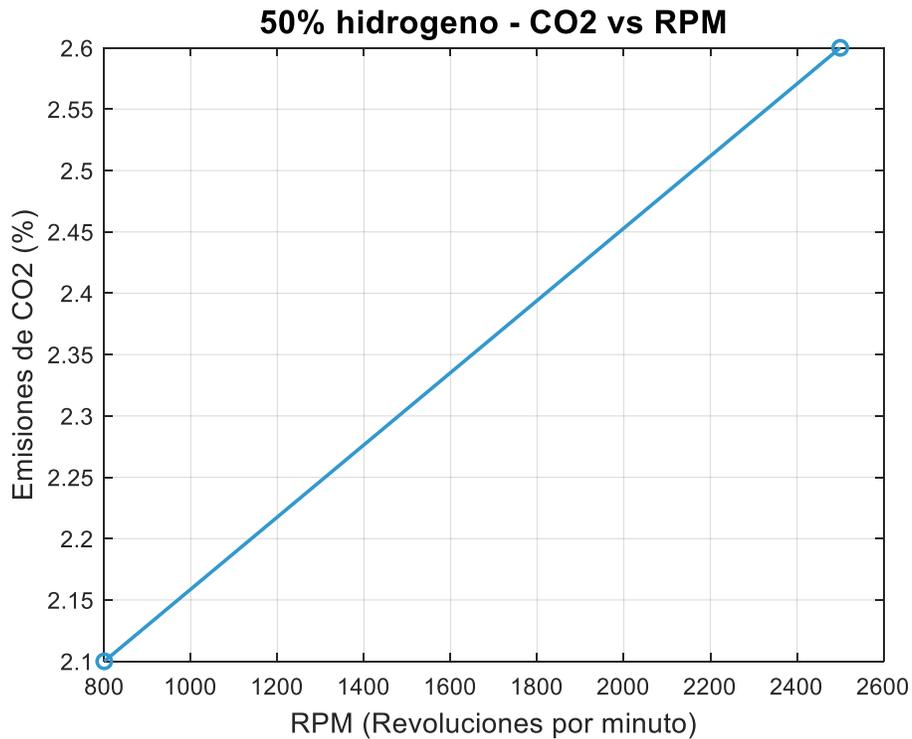
Nota: Imagen del CO<sub>2</sub> con 25% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.4) se observa la variación de CO<sub>2</sub> con 25% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 2.3% hasta 2.8% a 2500 rpm, estos valores bajan de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en un 2.5% en ralentí y 3.1% a 2500 rpm.

### 3.16 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO2 CON 50% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.5**

*Análisis de CO2 con 50% de hidrógeno*



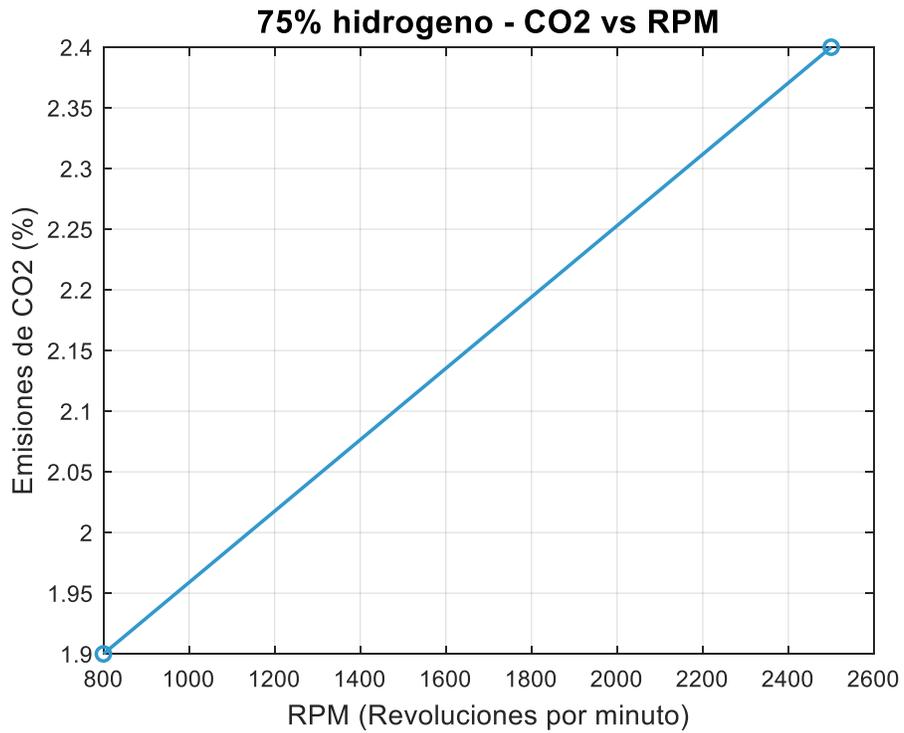
Nota: Imagen del CO2 con 50% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.5) se observa la variación de CO2 con 50% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 2.1% hasta 2.6% a 2500 rpm, estos valores disminuyen de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en un 2.5% en ralentí y 3.1% a 2500 rpm.

### 3.17 ANÁLISIS GRÁFICO DE CO2 CON 75% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.6**

*Análisis de CO2 con 75% de hidrógeno*



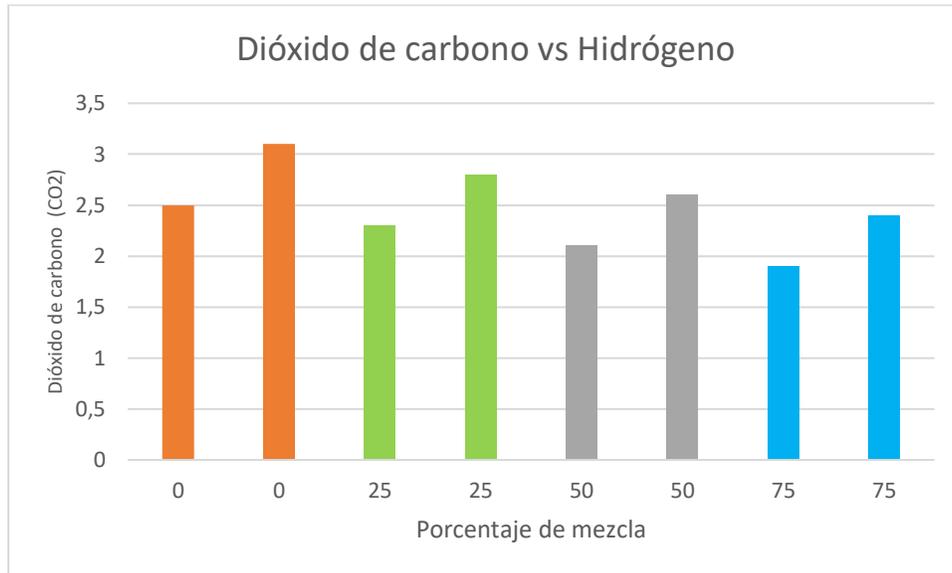
Nota: Imagen del CO2 con 75% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig.3.6) se observa la variación de CO2 con 75% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 1.9% hasta 2.4% a 2500 rpm, estos valores bajan considerablemente de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en un 2.5% en ralentí y 3.1% a 2500 rpm.

### 3.18 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

**Figura 3.7**

*Análisis general del CO<sub>2</sub>*



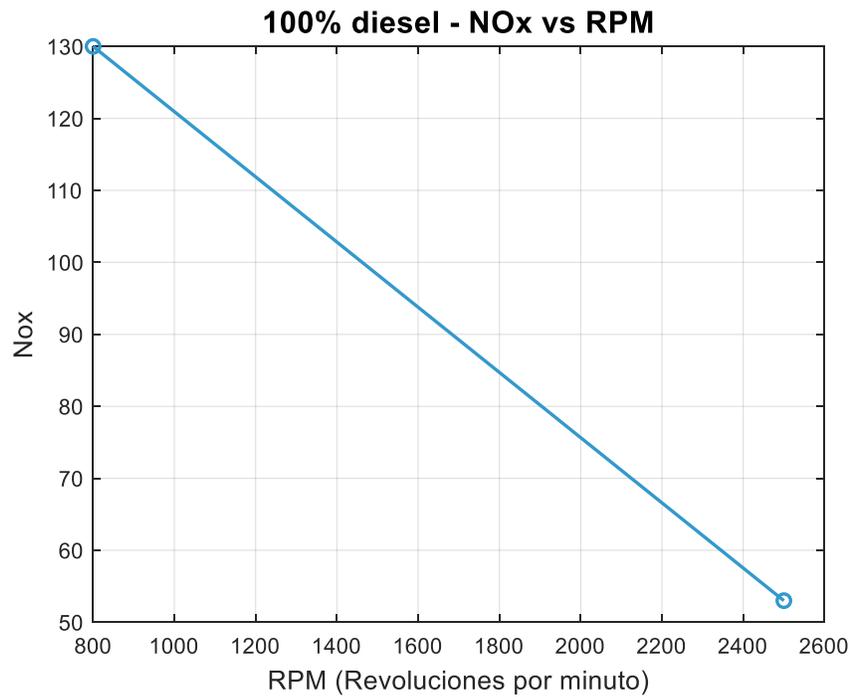
Nota: Imagen general del CO<sub>2</sub> con hidrógeno Fuente: Autores

Durante el análisis (fig. 3.7) de las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se observaron resultados diferentes según la suministración del hidrógeno al motor. A ralentí y a 2500 rpm, se detectó un aumento en la primera medida en los niveles de CO<sub>2</sub>. No obstante, al aumentar la suministración de hidrógeno al 75% a 2500 rpm, se evidenció una disminución del CO<sub>2</sub>.

### 3.19 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NOX CON 0% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.8**

*Análisis del NOx con 0% de hidrógeno*



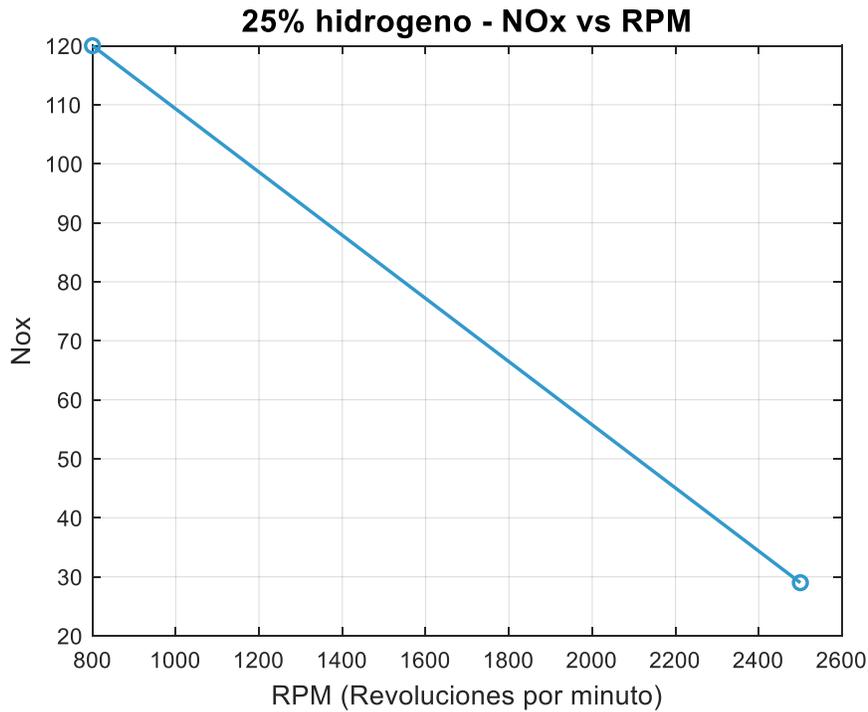
Nota: Imagen del NOx sin hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.8) se observa la variación del NOx con 0% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 130 ppm hasta 53 ppm a 2500 rpm, estos valores serian la referencia para la evaluación y comparación de los demás datos obtenidos.

### 3.20 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NO<sub>x</sub> CON 25% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.9**

*Análisis del NO<sub>x</sub> con 25% de hidrógeno*



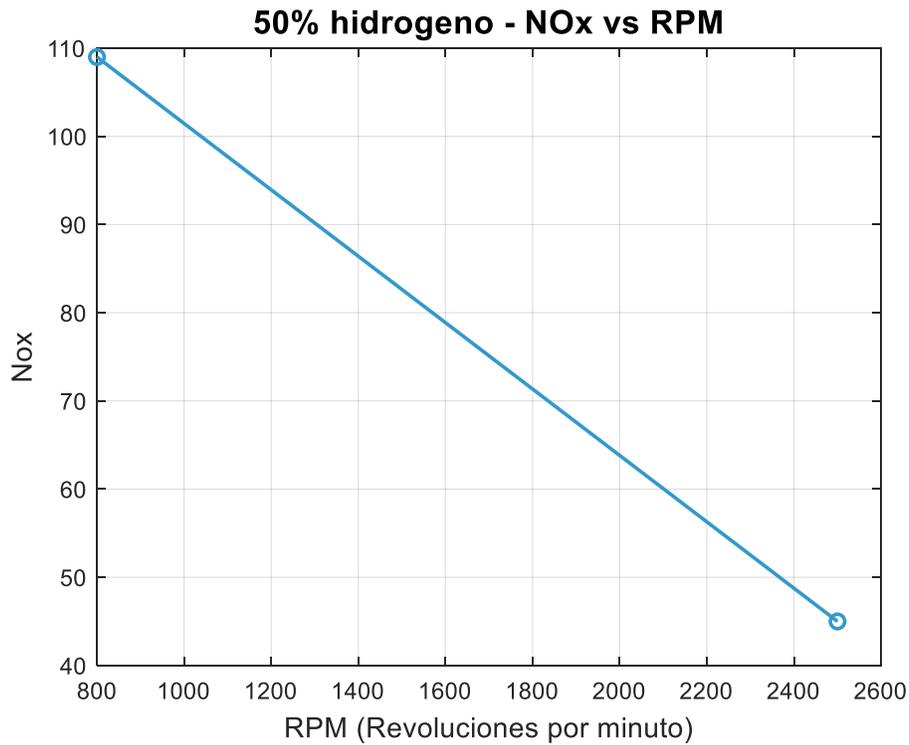
Nota: Imagen del NO<sub>x</sub> con 25% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.9) se observa la variación del NO<sub>x</sub> con 25% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 120 ppm hasta 29 ppm a 2500 rpm, estos valores disminuyen de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en 10 ppm en ralentí y 24 ppm a 2500 rpm.

### 3.21 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NO<sub>x</sub> CON 50% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.10**

*Análisis del NO<sub>x</sub> con 50% de hidrógeno*



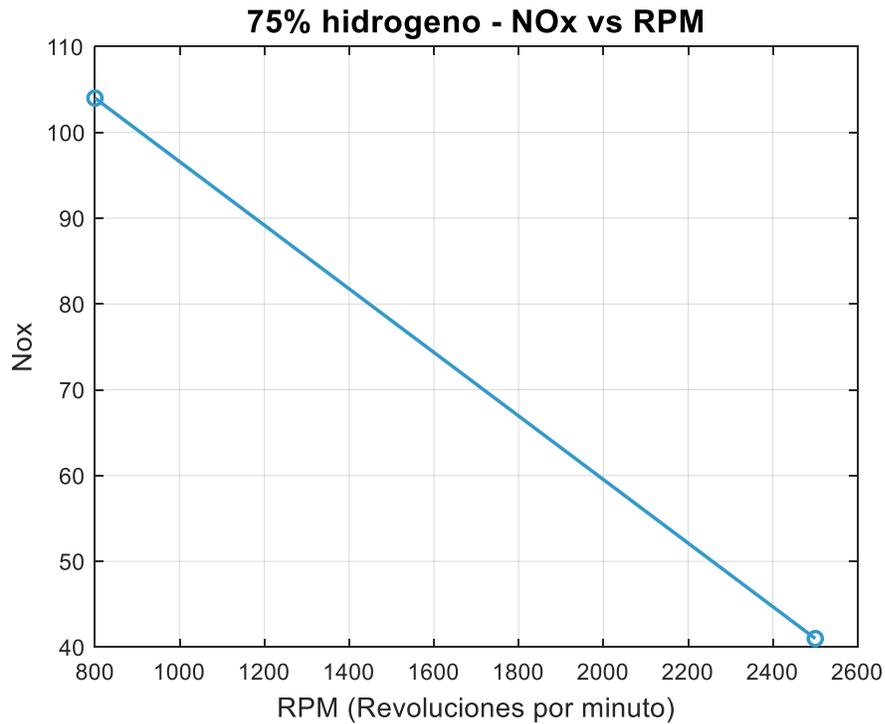
Nota: Imagen del NO<sub>x</sub> con 50% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig.3.10) se observa la variación del NO<sub>x</sub> con 50% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 109 ppm hasta 45 ppm a 2500 rpm, estos valores disminuyen de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en 21 ppm en ralentí y 8 ppm a 2500 rpm.

### 3.22 ANÁLISIS GRÁFICO DEL NO<sub>x</sub> CON 75% DE HIDRÓGENO

**Figura 3.11**

*Análisis del NO<sub>x</sub> con 75% de hidrógeno*



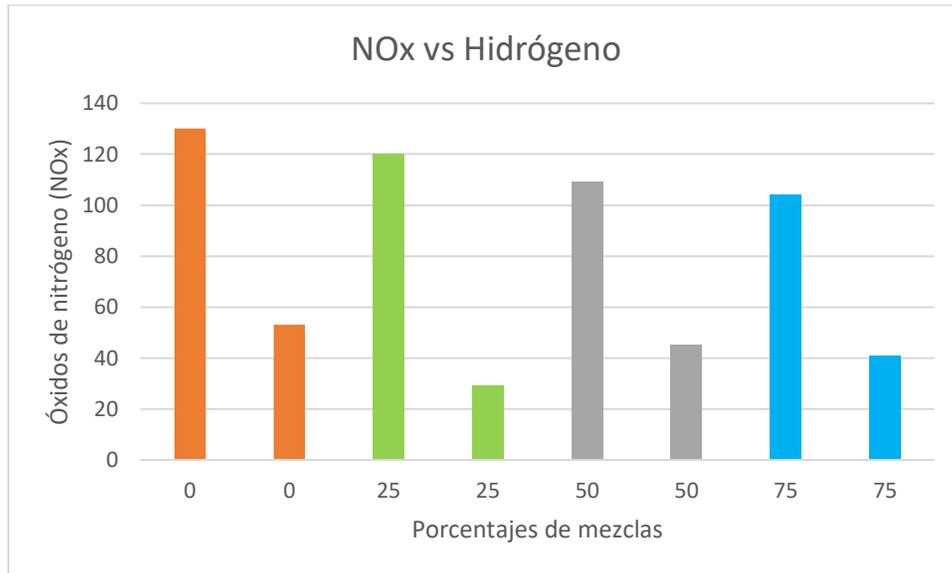
Nota: Imagen del NO<sub>x</sub> con 75% de hidrógeno Fuente: Autores

En esta gráfica (fig. 3.11) se observa la variación del NO<sub>x</sub> en con 75% de hidrógeno suministrado al motor diésel donde en ralentí se obtiene 104 ppm hasta 41 ppm a 2500 rpm, estos valores bajan de acuerdo con la primera medición tomada como referencia en un 26 en ralentí y 12 ppm a 2500 rpm.

### 3.23 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

**Figura 3.12**

*Análisis general de los NO<sub>x</sub>*



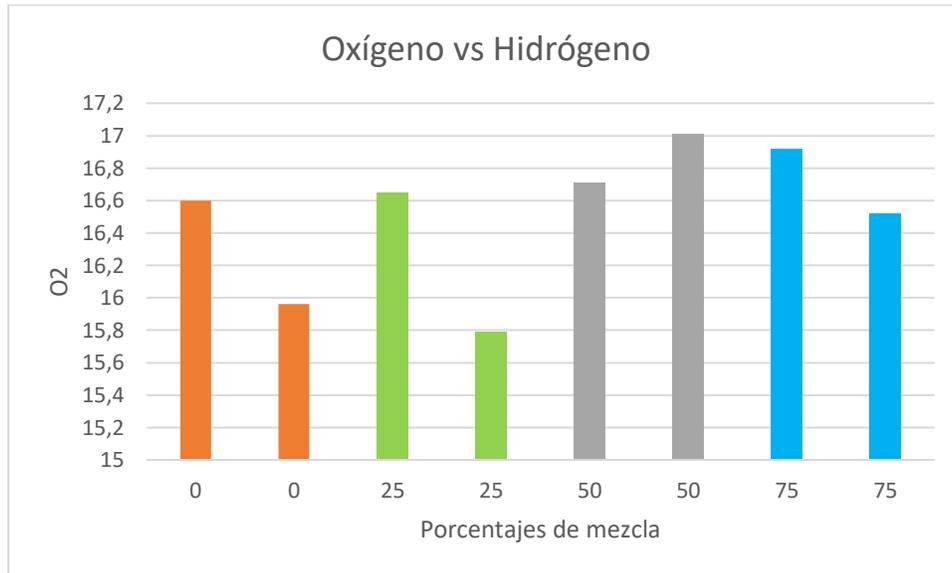
Nota: Imagen general del NO<sub>x</sub> con hidrógeno Fuente: Autores

En el análisis de los niveles de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), se logró el objetivo propuesto al incorporar hidrógeno en la mezcla de combustible, ya que se observó una reducción constante de aproximadamente un 75% en los niveles de NO<sub>x</sub> entre las pruebas realizadas a ralentí y a 2500 rpm para cada mezcla. En las condiciones operativas con diferentes porcentajes de hidrógeno, tanto a ralentí como a 2500 rpm, se notó que a medida que aumentaba la concentración de hidrógeno, los niveles de NO<sub>x</sub> disminuían considerablemente. Estos resultados demuestran que el hidrógeno tiene un impacto positivo en la reducción de NO<sub>x</sub> en los gases de escape.

### 3.24 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL OXÍGENO (O<sub>2</sub>)

**Figura 3.13**

*Análisis general del O<sub>2</sub>*



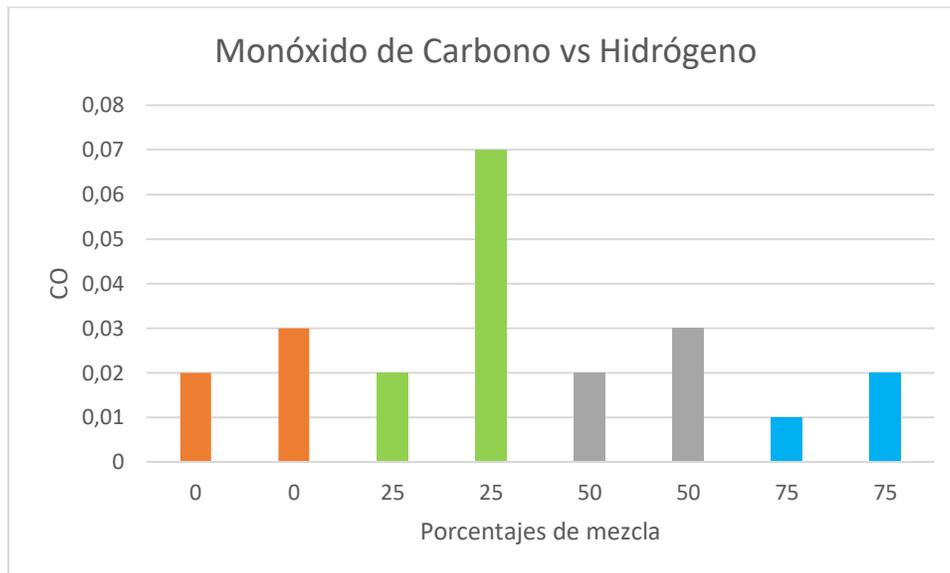
Nota: Imagen general del O<sub>2</sub> con hidrógeno Fuente: Autores

En el análisis de los niveles de oxígeno (ver fig. 3.13), se observó un aumento en su concentración. No obstante, al incrementar la cantidad de hidrógeno en la mezcla de combustible tanto a ralentí como a 2500 rpm, los niveles de oxígeno también aumentaron. Esta tendencia indica que la adición de hidrógeno en la mezcla de combustible podría estar contribuyendo al aumento de oxígeno en los gases de escape a mayores velocidades del motor.

### 3.25 ANÁLISIS GRÁFICO GENERAL DEL MONÓXIDO DE CARBONO (CO%)

**Figura 3.14**

*Análisis general del hidrogeno vs CO*



Nota: Imagen general del (CO) con hidrógeno Fuente: Autores

Durante las mediciones ver fig. 3.14 realizadas con diferentes concentraciones de hidrógeno, tanto en condiciones de ralentí como a 2500 rpm, se observó una reducción en las concentraciones de monóxido de carbono (CO). No obstante, al incrementar la velocidad del motor a 2500 rpm y a un 25% de hidrógeno, se registró un aumento en los niveles de oxígeno (O<sub>2</sub>), lo que puede atribuirse a la incorporación del hidrógeno, el cual pudo haber inducido un cambio térmico en el proceso de combustión. Estos resultados indican que el hidrógeno resultó ser efectivo en la disminución de las emisiones de CO en condiciones de ralentí y a 2500 rpm cuando se utilizó una mezcla con un 25% de diésel porque se estima una reducción del 50% con respecto a los valores iniciales.

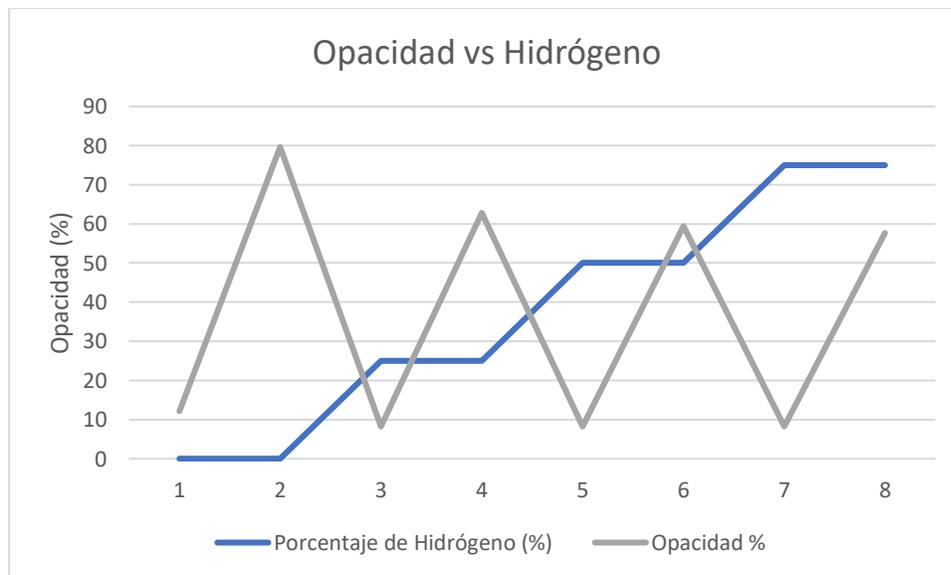
### 3.26 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis de las mediciones obtenidas muestra una clara relación entre las concentraciones de hidrógeno en la mezcla de combustible y las mejoras en la eficiencia de combustión, evidenciadas tanto en la reducción de la opacidad como en la disminución de las emisiones de CO y NOx. A su vez, las rpm del motor influyen significativamente en las emisiones, ya que, a mayor número de revoluciones, la combustión se vuelve más compleja, aumentando la formación de partículas y gases contaminantes, aunque el hidrógeno ayuda a mitigar este efecto.

En términos de opacidad, las mezclas con hidrógeno demostraron ser más limpias, especialmente a RPM más altas, lo que sugiere que el hidrógeno es eficaz en mejorar la combustión en motores diésel.

**Figura 3.15**

*Variación general de Opacidad*



*Nota:* En la imagen se observa la variación que tiene la opacidad en función de las mezclas de combustible e hidrogeno.

La incorporación de hidrógeno en las mezclas de combustible reduce consistentemente la opacidad, lo que indica menores emisiones de partículas contaminantes.

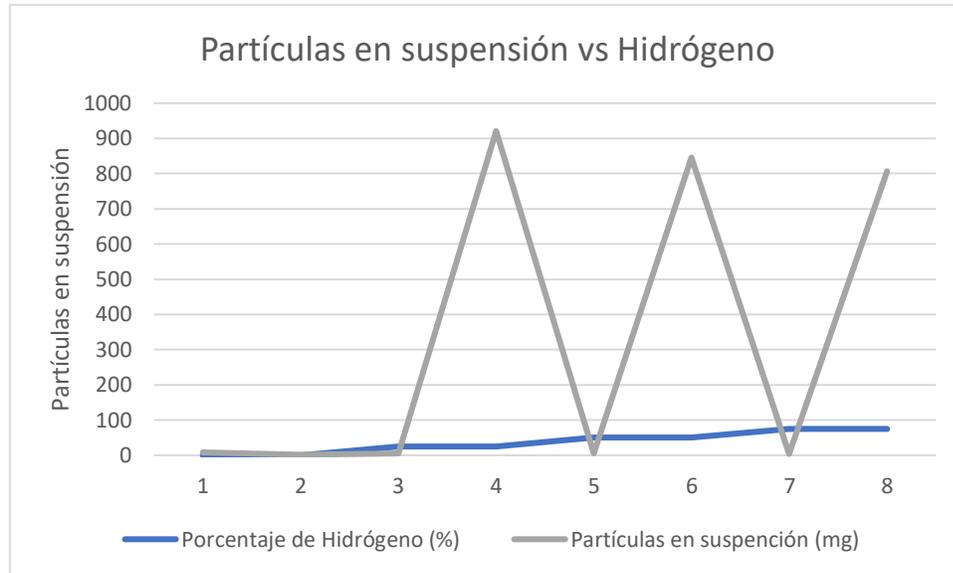
Para altos valores iniciales de opacidad (79,63%), el uso de hidrógeno al 75% reduce las emisiones hasta un 27,56%.

En condiciones de baja opacidad (12,1%), el uso de cualquier mezcla con hidrógeno (25%-75%) reduce las emisiones aproximadamente un 31,81%, manteniéndolas constantes en 8,24%.

Esto evidencia que el hidrógeno no solo mejora la eficiencia de la combustión, sino que también reduce las emisiones de partículas contaminantes, lo que es crucial para minimizar el impacto ambiental del motor.

**Figura 3.16**

*Partículas en suspensión*

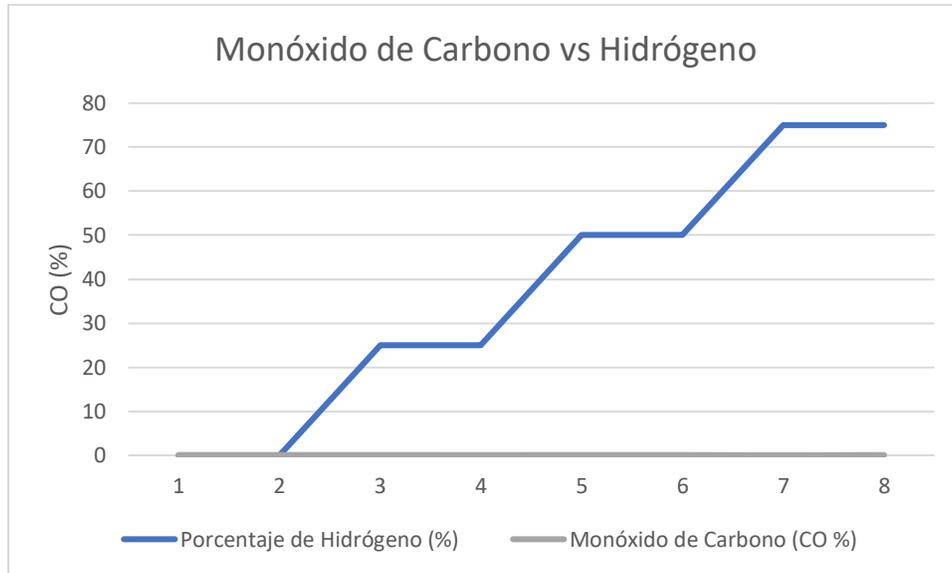


*Nota:* En la imagen se observa la variación que tienen las partículas en suspensión.

El aumento en el porcentaje de hidrógeno en la mezcla de combustible reduce de manera progresiva las partículas en suspensión. Con un 75% de hidrógeno, las emisiones disminuyen hasta un 49,59% y 47,01% en los escenarios analizados, en comparación con el caso base.

**Figura 3.17**

*Monóxido de Carbono*

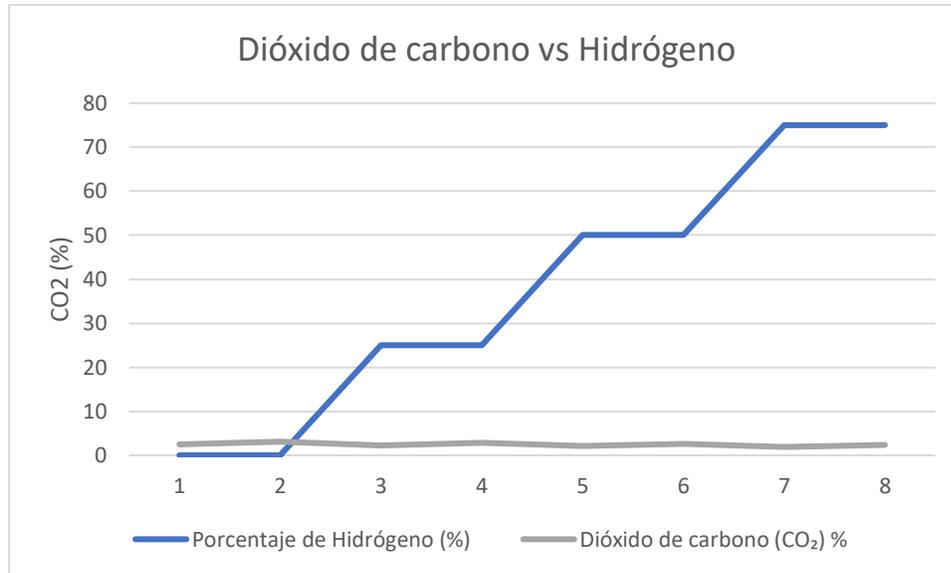


*Nota:* En la imagen se observa la variación que tiene el CO. Fuente: Autores

En general (fig. 3.17) el hidrógeno mejora la combustión y reduce la generación de CO, excepto en el caso del 25% de hidrógeno, donde se observa un leve aumento bajo condiciones específicas.

**Figura 3.18**

*Dióxido de carbono*

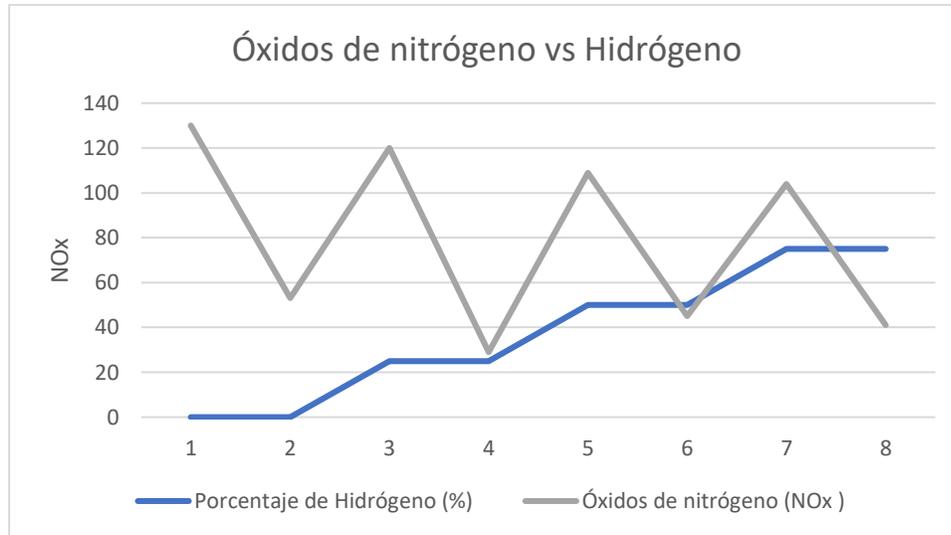


*Nota:* En la imagen se observa la variación que tiene el  $CO_2$ . Fuente: Autores

La incorporación de hidrógeno (fig. 3.18) en mezclas con diésel disminuye de forma efectiva las emisiones de dióxido de carbono, mostrando reducciones notables a medida que aumenta su proporción. Esto resalta el potencial del hidrógeno como una alternativa sostenible para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los motores de combustión interna.

**Figura 3.19**

*Óxidos de nitrógeno*



*Nota:* En la imagen se observa la variación que tiene el NOx. Fuente: Autores

El uso de mezclas de hidrógeno (fig. 3.19) con diésel reduce significativamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx). Con un 75% de hidrógeno, las emisiones disminuyen hasta un 20% en condiciones iniciales y un 22,64% en condiciones más exigentes. Esto evidencia que el hidrógeno mejora la combustión al reducir la formación de estos compuestos, aunque su efecto no es lineal debido a factores como la temperatura y la relación aire-combustible.

En condiciones más altas, donde las emisiones de NOx suelen ser mayores, las reducciones son más notables, llegando a un 45,28% con un 25% de hidrógeno. Esto sugiere que incluso pequeñas proporciones de hidrógeno tienen un impacto positivo en la disminución de estos contaminantes, lo que lo posiciona como una solución viable para mejorar la calidad del aire en aplicaciones de motores de combustión interna.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este proyecto técnico, proporcionan una visión detallada sobre el impacto de la adición de hidrógeno a la mezcla de combustible y la variación en las RPM sobre la opacidad y las emisiones generadas en el motor diésel H-100. Se pudo apreciar, que la inclusión de hidrógeno mejora la eficiencia de la combustión, reduciendo la opacidad y las emisiones de CO y material particulado. Sin embargo, las RPM del motor juegan un papel importante en las emisiones de NOx y PM, lo que sugiere que un enfoque integral que considere tanto la modificación de la mezcla de combustible como el ajuste de las condiciones operativas del motor puede ser clave para optimizar el rendimiento ambiental del motor diésel.

Al incrementar el porcentaje de hidrógeno en la mezcla de combustible, las emisiones de monóxido de carbono disminuyen significativamente.

A 800 rpm, la mayor reducción de CO ocurre con un 75% de hidrógeno, logrando una disminución del 50% en comparación con el caso base (0% de hidrógeno).

A 2500 rpm, la mezcla con un 25% y 75% de hidrógeno muestra una disminución del 33.33%, destacando que el hidrógeno promueve una combustión más eficiente incluso a altas revoluciones.

La validación de los datos asegura que los resultados obtenidos son confiables y pueden ser utilizados como base para el desarrollo de estrategias de reducción de emisiones en motores diésel. Este estudio contribuye al entendimiento de cómo el hidrógeno puede ser utilizado como un aditivo para mejorar la sostenibilidad de los motores diésel, con beneficios tanto en eficiencia como de reducción de contaminantes.

## RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros en el análisis de emisiones contaminantes de motores diésel con suministro de hidrógeno, se sugiere optimizar el sistema de inyección, evaluando parámetros como el caudal y la presión del hidrógeno, así como su automatización mediante controles electrónicos. Además, podría investigarse la durabilidad del motor ante el uso prolongado de hidrógeno, estudiando posibles desgastes en componentes clave como pistones y válvulas.

Es esencial analizar el impacto del hidrógeno en el rendimiento del motor, considerando su eficiencia térmica bajo distintas cargas y condiciones operativas. También se recomienda extender los estudios a motores diésel modernos con tecnologías avanzadas como Common Rail o Euro VI, para determinar diferencias en el comportamiento.

La viabilidad ambiental y económica del sistema podría evaluarse a través de análisis del ciclo de vida (LCA) y costos de implementación a escala comercial. Asimismo, medir emisiones específicas como NO<sub>x</sub>, HC y partículas ultrafinas con métodos avanzados permitiría un enfoque más detallado.

Por último, se sugiere explorar aplicaciones en altura para evaluar el desempeño en condiciones de menor presión de oxígeno, así como desarrollar estándares normativos para la integración de hidrógeno en motores diésel. Adicionalmente, estudios de percepción pública podrían facilitar la aceptación de esta tecnología sostenible en el mercado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alkidas, A. C. (2007). "Combustion advancements in gasoline engines." *Energy Conversion and Management*, 48(11), 2751-2761. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.027>
- Das, L. M. (2002). "Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi." *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(9), 953-965. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00181-5)
- Kumar, M. S., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2003). "Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine." *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1143-1154. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00173-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00173-4)
- Saravanan, N., Nagarajan, G., & Narayanasamy, S. (2008). "An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique." *Renewable Energy*, 33(3), 422-427. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.020>
- Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). "Hydrogen-fueled internal combustion engines." *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490-527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.00>
- Minitab, L. 2. (2022). <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>.
- MORA, C. E. (2022). <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23656/1/UPS-GT003999.pdf>.
- Motor. (2014). <https://es.slideshare.net/slideshow/el-motor-39540893/39540893>.
- Panamito, A. O. (2015). <https://45.235.140.22/bitstream/123456789/7693/1/UPS-CT004555.pdf>
- INEN. (2013). NTE 2202:2013. *Primera*. Quito.
- INEN. (17 de Abril de 2002). NTE 2207: 2002. *Primera*. Quito.
- García, A., & Agudelo, J. (2019). Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(34), 40-51.
- López, J., & Martínez, P. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles alternativos en motores diésel. *Ingeniería Mecánica*, 21(3), 45-53.
- García, A. (2017). Análisis de estrategias para la combustión dual gasóleo-hidrógeno orientadas a la reducción de emisiones: desarrollo teórico-experimental sobre motor diésel. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. *Dialnet*.
- Gómez Montoya, J. A., & Agudelo S., J. R. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154.

Lema Loja, J. L. (2022). Emisiones y temperaturas de los gases de escape de un motor utilizando combustibles de diferente octanaje durante el arranque en frío. *Politécnica*, 7(10), 138-160.

Velástegui, E., Pallo, B., & Llumiquinga, D. (2015). Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna. *Revista Politécnica*, 36(3), 89-95.

Gómez Montoya, J. A., & Agudelo S., J. R. (2020). Evaluación del comportamiento mecánico y ambiental de un motor de combustión interna operado con mezclas de biogás e hidrógeno.

## ANEXOS

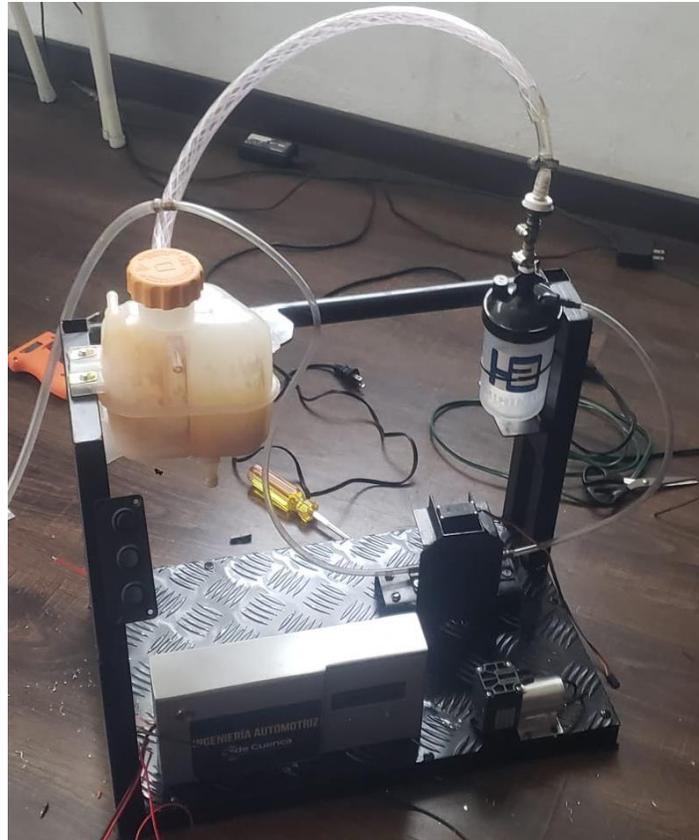
### Anexo 1

#### *Ficha técnica del analizador de gases*

		<b>QGA 6000</b>			
<b>Medición</b>	CO, HC, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Lambda, AFR, NO <sub>x</sub> (opcional)				
<b>Método de medición</b>	CO, HC, CO <sub>2</sub> : Método NDIR O <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> : Célula Electroquímica				
<b>Rango de medición</b>	CO	0.00 ~ 9.99%	HC	0 ~ 9999 ppm	
<b>Resolución</b>		0.01%		1 ppm	
<b>Display</b>	4 dígitos LED 7segment		4 ó 5 dígitos LED 7segment		
<b>Rango de medición</b>	CO <sub>2</sub>	0.0 ~ 20.0%	O <sub>2</sub>	0.00 ~ 25.00 %	
<b>Resolución</b>		0.1%		0.01 %	
<b>Display</b>	4 dígitos LED 7segment		4 dígitos LED 7segment		
<b>Rango de medición</b>	Lambda	0 ~ 2.000	AFR	0.0 ~ 99.0	
<b>Resolución</b>		0.001		0.1	
<b>Display</b>	4 dígitos LED 7segment		4 dígitos LED 7segment		
<b>Rango de medición</b>	NO <sub>x</sub> (Opción)	0-5000 ppm			
<b>Resolución</b>		1 ppm			
<b>Display</b>		4 dígitos LED 7segment			
<b>Repetibilidad</b>	Menos de ±2% FS				
<b>Tiempo de respuesta</b>	Dentro de 10 segundos (más de 90%)				
<b>Tiempo calentamiento</b>	Aproximadamente 2 ~ 8 minutos				
<b>Cantidad de muestra recogida</b>	4 ~ 6 L/min				
<b>Alimentación</b>	220V CA o 110V CA ±10% 50 o 60Hz				
<b>Consumo</b>	Aproximadamente 50 W				
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	0°C ~ 40°C				
<b>Dimensiones</b>	420 (W) × 298 (D) × 180 (H) en mm				
<b>Peso</b>	Aproximadamente 6.9 kg				
<b>Accesorios básicos</b>	Sonda, manguera de la Sonda, fusible de repuesto, tapón de prueba de fuga, filtro de repuesto, manual del Funcionamiento, cable de alimentación, cable de comunicación RS232, Impresora, papel de la impresora,				

## Anexo 2

### *Modificaciones en el generador de hidrógeno*



### Anexo 3

*Caudalímetro usado en el generador*

