



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Investigación de la incidencia del sistema de inyección BI-FUEL y DUAL -FUEL de hidrógeno, en el control de emisiones de los motores de combustión interna de encendido por compresión.

Mariscal Guambi, Deisy Carolina y Ortiz Santiana, Alan Esteban

Departamento de ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del Título de Ingeniero Automotriz

Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio

18 de agosto del 2022

Latacunga



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Reporte de verificación de contenidos



Identical Words	725
Words with Minor Changes	218
Paraphrased Words	1390
Omitted Words	0

 Website | Education | Businesses

Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio Msc.

C. C.: 0502509995



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Investigación de la incidencia del sistema de inyección bi-fuel y dual -fuel de hidrógeno, en el control de emisiones de los motores de combustión interna de encendido por compresión"** fue realizado por los señores **Mariscal Guambi, Deisy Carolina y Ortiz Santiana, Alan Esteban**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de agosto de 2022

Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio Msc.

C. C.: 0502509995



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Responsabilidad de autoría

Nosotros, **Mariscal Guambi, Deisy Carolina** y **Ortiz Santiana, Alan Esteban**, con cédula de ciudadanía n° 1726265372 y 1723815831 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Investigación de la incidencia del sistema de inyección bi-fuel y dual -fuel de hidrógeno, en el control de emisiones de los motores de combustión interna de encendido por compresión”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 18 de agosto de 2022

Mariscal Guambi, Deisy Carolina

Ortiz Santiana, Alan Esteban



Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de publicación

Nosotros, **Mariscal Guambi, Deisy Carolina y Ortiz Santiana, Alan Esteban**, con cédula de ciudadanía n° **1726265372** y **1723815831**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"INVESTIGACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN BI-FUEL Y DUAL -FUEL DE HIDRÓGENO, EN EL CONTROL DE EMISIONES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 18 de agosto de 2022

Mariscal Guambi, Deisy Carolina

C.C.: 1726265372

Ortiz Santiana, Alan Esteban

C.C.: 1723815831

Dedicatoria

Dedico este proyecto primero a Dios por permitirme la oportunidad de llegar a esta etapa de mi vida, por bendecirme y brindarme salud, por no desampárame en mis momentos difíciles y darme consuelo cuando me encontraba sola.

A Luis Mariscal mi padre amado, por estar siempre a mi lado apoyándome y motivándome en este camino de la ciencia y técnica automotriz, gracias, padre, porque sin ti, esto no sería posible. A mi madre María Guambi que siempre me brindo su apoyo y cariño y como no nombrar a mi hermano David Chicaiza quien fue un eje importante a lo largo de la carrera.

También a mis hermanos Ramiro, Mónica, Édison, Daniel y Pilar, que, con su apoyo y motivación incondicional, forjaron en mí el carácter necesario para alcanzar esta meta.

Gracias por estar siempre a mi lado y ser tan buenos hermanos.

A mi pareja Alexander Esparza, le dedico este logro y muchos más, gracias por no dejarme sola y estar siempre a mi lado en todos los momentos, eres mi refugio en todas las adversidades y juntos lograremos cumplir nuestras metas.

Finalmente, a mis compañeros de la universidad, que hemos luchado hombro a hombro tras el objetivo de cumplir nuestros sueños, gracias por dar su granito de arena y por ser más que amigos una familia, la familia Automotriz.

MARISCAL GUAMBI, DEISY CAROLINA

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Marco y Sonia, ya que son las personas que día a día me han demostrado cariño, afecto y sobre todo ese apoyo incondicional con sabiduría y consejos para poder ser la persona que soy ahora.

A mis hermanos Israel, Alexander y Antonio, quienes con sus logros y apoyo me han motivado a seguir adelante en mis sueños y estudios.

A dos personas importantes en mi infancia y que ahora me cuidan desde el cielo, Laura y Orfelina quienes gracias a su humildad y sus enseñanzas formaron en mí el carácter de un líder.

También dedico el presente trabajo a una persona que ha llegado a ser un pilar fundamental en mi vida en este último par de años, a Angélica, quien hasta el final de la edición de este trabajo ha estado junto a mí apoyándome.

Agradecimiento

Infinitamente agradecida con Dios por brindarme salud y las fuerzas para poder culminar este proyecto, por la salud y las bendiciones que ha puesto en mi vida, muchas gracias, señor.

A mis padres y hermanos, que siempre me dieron la motivación para cumplir mis metas y que nunca dejaron de apoyarme en seguir adelante con mis estudios.

Al Ingeniero Leonidas Quiroz, por su paciencia y motivación, por brindarnos la oportunidad de trabajar junto a él, y adquirir el conocimiento en su haber, muchas gracias por darnos la confianza y su tiempo.

A Alexander por estar siempre a mi lado, durante varios años apoyándome y guiándome a ser siempre mejor persona, gracias por compartir conmigo este logro más en mi vida.

A Isabel Chiluisa que es una segunda madre para mí, le agradezco de todo corazón por acogerme en su familia, por todos los consejos y apoyo para cumplir este propósito.

A todas las personas que de una u otra manera me apoyaron con su granito de arena, por alentarme y darme su apoyo cuando lo necesite, muchas gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, y a sus docentes por compartir sus conocimientos, sobre todo al departamento de energía y mecánica que han nutrido mi conocimiento sobre la industria automotriz.

MARISCAL GUAMBI, DEISY CAROLINA

Agradecimiento

Quiero agradecer en primer lugar a Dios quien cada mañana me ha dado la oportunidad de empezar de nuevo, de aprender de mis errores y permitirme seguir en la lucha hacia mis sueños.

A mis padres Marco y Sonia, quienes confiaron siempre en mí y estuvieron no solo en esta etapa importante de mi vida, sino en todo momento.

A mis hermanos Israel, Alexander y Antonio por su apoyo incondicional y por motivarme a seguir adelante.

A Angélica por ser ese apoyo incondicional, darme siempre los motivos de que siempre hay algo bueno por venir y brindarme la gracia de estar en su vida.

A mí compañera de tesis, quien a lo largo de toda la carrera se ha convertido en mi dupla para hacer funcionar todo lo que se nos presente, pero sobre todo por ser esa amiga con quién se puede contar en los buenos y malos momentos.

A mí tutor de tesis, por habernos brindado la oportunidad de trabajar con él, por su apoyo en todo momento para lograr con éxito la realización de esta tesis.

También, agradecer a todo el departamento de Energía y Mecánica, porque ahí encontré no solo buenos docentes sino amigos para toda la vida.

Y a todas las personas que me ayudaron desinteresadamente durante todo este camino hacia la meta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	1
Reporte de verificación de contenidos.....	2
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	15
Índice de tablas.....	19
Resumen.....	22
Abstract	23
Capítulo I Planteamiento del problema de investigación.....	24
Antecedentes	24
Planteamiento del problema	26
Justificación e importancia	27
Objetivos del proyecto.....	28
<i>Objetivo general</i>	28
<i>Objetivos específicos.....</i>	28
Hipótesis.....	29
Variables de investigación	29
<i>Variables dependientes.....</i>	29
<i>Variable independiente</i>	29

Capítulo II Fundamentación Teórica.....	30
El hidrógeno: propiedades y características	30
<i>Características físicas y químicas</i>	<i>30</i>
<i>Propiedades Del Hidrógeno.....</i>	<i>33</i>
<i>Propiedades químicas del hidrógeno</i>	<i>34</i>
<i>El hidrógeno como combustible</i>	<i>42</i>
<i>Ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible.....</i>	<i>43</i>
Métodos De Obtención De Hidrógeno Ventajas Y Desventajas.....	43
<i>Obtención Del Hidrógeno Por Electrolisis Del Agua</i>	<i>45</i>
Uso Del Hidrógeno En Los Motores De Combustión Interna.....	46
<i>Hidrógeno Como Combustible Único De Un MCI.....</i>	<i>46</i>
<i>Hidrógeno Como Mejorador De La Combustión De Un MCI.....</i>	<i>47</i>
Kit De Generación De Hidrógeno Para Vehículos Con MCI	47
<i>Definición.....</i>	<i>47</i>
<i>Componentes</i>	<i>47</i>
<i>Funcionamiento.....</i>	<i>48</i>
Combustión	50
<i>Combustión MEP.....</i>	<i>50</i>
<i>Combustión MEC.....</i>	<i>51</i>
Emisiones.....	52
<i>Gases Nocivos.....</i>	<i>52</i>
<i>Gases No Nocivos.....</i>	<i>52</i>
<i>Emisiones Vehículos Gasolina.....</i>	<i>52</i>

<i>Emisiones Vehículos Diésel</i>	53
Relación Aire Combustible, Gases De Escape Y Rendimiento Del Motor	54
<i>Los Gases De Escape Y La Relación Aire Combustible</i>	54
<i>El Rendimiento Del Motor Y La Relación Aire Combustible</i>	55
<i>Análisis De Los Productos De La Combustión</i>	55
Normas Técnicas	55
<i>NTE INEN 2202:2013</i>	55
<i>NTE INEN 2203:2013</i>	56
<i>NTE INEN 2204:2017</i>	56
<i>NTE INEN 2207:2002</i>	56
<i>NTE INEN 2349:2003</i>	56
<i>SAE J1667</i>	56
Equipos De Medición	57
<i>Analizador De Gases Brain Bee Mahle AGS – 688</i>	57
<i>Opacímetro Bear 57-220</i>	58
<i>Medidor De RPM MGT-300</i>	59
Capítulo III Implementación del estudio	61
Modo de empleo del hidrógeno en vehículos	61
Puesta A Punto De Los Motores MEP Y MEC	62
Puesta A Punto Sistema Eléctrico Y Electrónico.....	64
<i>Puesta A Punto MEC</i>	66
Uso De Los Equipos De Medición	66
<i>Uso Del Analizador De Gases</i>	67

<i>Uso del opacímetro</i>	70
Protocolos para la medición de emisiones de gases de escape	72
<i>Protocolo MEP Antes Y Después Del Uso De Hidrógeno</i>	73
<i>Protocolo MEC Antes Y Después Del Uso De Hidrógeno</i>	75
Ejecución de los protocolos.....	77
<i>Prueba de emisiones de gases de MEP</i>	77
<i>Prueba de opacidad de MEC</i>	84
Parámetros De Comparación Con La Normativa	91
<i>Parámetros de normalización de emisiones para MEP</i>	91
<i>Parámetros de normalización de emisiones para MEC</i>	94
Capítulo IV Análisis de Resultados	97
MEP – Análisis De Gases Continuo	97
<i>Datos - Análisis De Gases Continuos Sin Hidrógeno</i>	97
<i>Datos - Análisis De Gases Continuos Con Hidrógeno</i>	98
<i>Comparación Análisis De Gases Continuo – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno</i>	98
<i>MEP - Variación De Datos CO₂ – O₂</i>	107
<i>MEP - Variación De Datos Lambda – HC</i>	109
<i>MEP - Variación De Datos Lambda - CO₂ – HC</i>	111
<i>MEP - Variación De Datos CO – O₂</i>	113
<i>MEP - Variación De Datos Lambda - CO₂</i>	114
<i>MEP - Variación De Datos RPM – NO</i>	116
<i>MEP – Variación De Datos CO_{corr}– CO – CO₂– LAMBDA</i>	117

MEP – Análisis De Gases Oficial.....	119
<i>Datos – Análisis Oficial Sin Hidrógeno.....</i>	<i>119</i>
<i>Datos – Análisis Oficial Con Hidrógeno</i>	<i>121</i>
<i>Comparación Y Análisis De Gases Oficial – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno – Prueba Al Mínimo.....</i>	<i>122</i>
<i>Comparación Y Análisis De Gases Oficial – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno – Prueba En Aceleración.....</i>	<i>129</i>
<i>MEP - Variación De Datos CO2 – O2</i>	<i>137</i>
<i>MEP - Variación De Datos Lambda – HC</i>	<i>140</i>
<i>MEP - Variación De Datos Lambda – CO2 - HC.....</i>	<i>143</i>
<i>MEP - Variación De Datos CO – O2</i>	<i>146</i>
<i>MEP - Variación De Datos Lambda – CO2</i>	<i>150</i>
MEC – Medición De Opacidad.....	153
<i>Datos - Medición De Opacidad Sin Hidrógeno</i>	<i>153</i>
<i>Datos - Medición De Opacidad Con Hidrógeno.....</i>	<i>154</i>
<i>Comparación De Valores Obtenidos.....</i>	<i>154</i>
Capítulo V Conclusiones Y Recomendaciones	157
Conclusiones	157
Recomendaciones	159
Bibliografía	160
Anexos.....	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, con relación a la temperatura.....</i>	38
Figura 2. <i>Rango de inflamabilidad de varios combustibles.....</i>	39
Figura 3. <i>Mapa de varios procesos para la obtención de hidrógeno.....</i>	44
Figura 4. <i>Esquema del funcionamiento y elementos de un electrolizador de agua.....</i>	46
Figura 5. <i>Kit de generación de hidrógeno.....</i>	48
Figura 6. <i>Funcionamiento del kit de generación de hidrógeno en un MCI.....</i>	49
Figura 7. <i>Analizador de gases de escape Brain Bee Mahle AGS – 688.....</i>	58
Figura 8. <i>Opacímetro Bear 57 – 220.....</i>	59
Figura 9. <i>Medidor de RPM MGT – 300 EVO.....</i>	60
Figura 10. <i>Protocolo para el uso del hidrógeno en los vehículos de prueba.....</i>	61
Figura 11. <i>Protocolo para la puesta a punto del motor de los vehículos de prueba.....</i>	63
Figura 12. <i>Sección A del protocolo de la puesta a punto del motor de los vehículos de prueba.....</i>	64
Figura 13. <i>Protocolo puesta a punto sistema eléctrico.....</i>	65
Figura 14. <i>Protocolo puesta a punto del sistema electrónico.....</i>	66
Figura 15. <i>Protocolo para verificar las condiciones de operación del vehículo de prueba previo a la medición de gases de escape.....</i>	67
Figura 16. <i>Ubicación y uso del analizador de gases de escape en el vehículo de prueba.....</i>	68
Figura 17. <i>Protocolo del uso del analizador de gases de escape.....</i>	69
Figura 18. <i>Forma de colocación del opacímetro en el vehículo de prueba.....</i>	70
Figura 19. <i>Protocolo para el uso del opacímetro.....</i>	71

Figura 20. <i>Protocolo para ejecutar el análisis de gases de escape en el MEP sin hidrógeno.</i>	73
Figura 21. <i>Protocolo para ejecutar el análisis de gases de escape en el MEP con hidrógeno.</i>	74
Figura 22. <i>Protocolo para ejecutar el análisis de opacidad en el MEC sin hidrógeno.</i>	75
Figura 23. <i>Protocolo para ejecutar el análisis de opacidad en el MEC con hidrógeno.</i>	76
Figura 24. <i>Interfaz del analizador de gases de escape.</i>	77
Figura 25. <i>Interfaz para el test oficial – prueba al mínimo.</i>	78
Figura 26. <i>Ubicación de la sonda en el tubo de escape del vehículo de prueba.</i>	78
Figura 27. <i>Lectura de las emisiones en ralentí.</i>	79
Figura 28. <i>Lectura de las emisiones a 2500 RPM</i>	79
Figura 29. <i>Reporte emitido por el software del equipo al terminar la prueba de Test Oficial</i>	80
Figura 30. <i>Interfaz de inicio de la prueba continua</i>	81
Figura 31. <i>Colocación de la sonda de medición a la salida del escape para la prueba continua</i>	81
Figura 32. <i>Interfaz prueba continua – ralentí</i>	82
Figura 33. <i>Interfaz prueba continua – 1000 RPM</i>	82
Figura 34. <i>Interfaz prueba continua – 2000 RPM</i>	83
Figura 35. <i>Interfaz prueba continua – 3000 RPM</i>	83
Figura 36. <i>Reporte emitido por el software del equipo al terminar la medición de prueba continua.</i>	84
Figura 37. <i>Conexión y verificación del uso del opacímetro</i>	85

Figura 38. <i>Interfaz para el inicio de la prueba y colocación de la sonda</i>	85
Figura 39. <i>Ejecución de la medición de opacidad de los distintos ensayos</i>	86
Figura 40. <i>Reporte generado por el software de control del opacómetro al terminar la prueba</i>	87
Figura 41. <i>Interfaz de prueba continua en MEC del software de control del analizador de gases</i>	88
Figura 42. <i>Control del ingreso de la sonda de medición de gases de escape</i>	89
Figura 43. <i>Interfaz de la prueba continua en MEC – 1000 rpm</i>	89
Figura 44. <i>Informe generado del ensayo de prueba continua en MEC</i>	90
Figura 45. <i>Comparación valores obtenidos prueba 1</i>	100
Figura 46. <i>Comparación valores obtenidos prueba 2</i>	102
Figura 47. <i>Comparación valores obtenidos prueba 3</i>	103
Figura 48. <i>Comparación valores obtenidos prueba 4</i>	105
Figura 49. <i>Comparación valores obtenidos prueba 5</i>	106
Figura 50. <i>Resultados y variación CO₂ – O₂</i>	108
Figura 51. <i>Resultados y variación Lambda - HC</i>	110
Figura 52. <i>Resultados y variación lambda - CO₂ - HC</i>	112
Figura 53. <i>Resultados y variación CO - O₂</i>	114
Figura 54. <i>Resultados y variación Lambda - CO₂</i>	115
Figura 55. <i>Resultados y variación RPM - NO</i>	117
Figura 56. <i>Resultados y variación CO_{corr} – CO – CO₂ – LAMBDA</i>	118
Figura 57. <i>Prueba 1 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	123
Figura 58. <i>Prueba 2 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	124

Figura 59. Prueba 3 – MEP – con H2 vs sin H2	126
Figura 60. Prueba 4 – MEP – con H2 vs sin H2	127
Figura 61. Prueba 5 – MEP – con H2 vs sin H2	129
Figura 62. Prueba 1 – MEP – con H2 vs sin H2	130
Figura 63. Prueba 2 – MEP – con H2 vs sin H2	132
Figura 64. Prueba 3 – MEP – con H2 vs sin H2	133
Figura 65. Prueba 4 – MEP – con H2 vs sin H2	135
Figura 66. Prueba 5 – MEP – con H2 vs sin H2	136
Figura 67. Resultados y variación CO2 - O2 prueba al mínimo	138
Figura 68. Resultados y variación CO2 - O2 prueba en aceleración.	139
Figura 69. Resultados y variación lambda - HC prueba al mínimo	141
Figura 70. Resultados y variación lambda - HC prueba en aceleración.....	142
Figura 71. Resultados Y Variación Lambda - CO2 - HC Prueba Al Mínimo.....	144
Figura 72. Resultados y variación lambda - CO2 - HC prueba en aceleración	145
Figura 73. Resultados y variación CO – O2 prueba al mínimo	147
Figura 74. Resultados y variación CO - O2 prueba en aceleración	148
Figura 75. Resultados y variación Lambda - CO2 prueba al mínimo.....	151
Figura 76. Resultados y variación Lambda - CO2 prueba en aceleración	152
Figura 77. Comparación de valores obtenidos	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Características físicas del hidrógeno</i>	31
Tabla 2. <i>Cuadro de comparación de las características del hidrógeno con otros combustibles</i>	32
Tabla 3. <i>Comparativa de las propiedades físicas y químicas del hidrógeno.</i>	33
Tabla 4. <i>Densidad de la energía de varios combustibles</i>	36
Tabla 5. <i>Punto de inflamación de algunos combustibles</i>	37
Tabla 6. <i>Temperatura de autoencendido de varios combustibles</i>	40
Tabla 7. <i>Numero octano de diferentes combustibles</i>	40
Tabla 8. <i>Rangos de medición del analizador de gases de escape Brain Bee AGS – 688.</i> 57	
Tabla 9. <i>Escala de rango del equipo de opacidad Bear 57 - 220</i>	59
Tabla 10. <i>Condiciones ambientales para las mediciones de gases</i>	72
Tabla 11. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos con motor a gasolina (Prueba estática en marcha mínima o ralentí).</i>	91
Tabla 12. <i>Límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (ciclos americanos FTP – 75, gmi)</i>	92
Tabla 13. <i>Límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (Directiva de la UE 98/69/CE)</i>	93
Tabla 14. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica*, ciclos americanos)</i>	94
Tabla 15. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica*, ciclos europeos)</i>	95
Tabla 16. <i>Limites de opacidad para vehículos diésel para prueba de aceleración libre</i>	96
Tabla 17. <i>Análisis de gases continuo - MEP - sin hidrógeno</i>	97

Tabla 18. <i>Análisis De Gases - Mep - Con Hidrógeno</i>	98
Tabla 19. <i>Prueba 1 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	99
Tabla 20. <i>Prueba 2 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	101
Tabla 21. <i>Prueba 3 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	103
Tabla 22. <i>Prueba 4 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	104
Tabla 23. <i>Prueba 5 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	106
Tabla 24. <i>Variación de datos CO₂ – O₂</i>	107
Tabla 25. <i>Variación de datos Lambda – HC</i>	109
Tabla 26. <i>Variación de datos LAMBDA - CO₂ – HC</i>	111
Tabla 27. <i>Variación de datos CO – O₂</i>	113
Tabla 28. <i>Variación de datos Lambda - CO₂</i>	115
Tabla 29. <i>Variación de datos RPM – NO</i>	116
Tabla 30. <i>Variación de datos COcorr - CO - CO₂ - Lambda</i>	118
Tabla 31. <i>Análisis oficial sin hidrógeno – prueba al mínimo</i>	120
Tabla 32. <i>Análisis oficial sin hidrógeno – prueba en aceleración</i>	120
Tabla 33. <i>Análisis oficial con hidrógeno – prueba al mínimo</i>	121
Tabla 34. <i>Análisis oficial con hidrógeno – prueba en aceleración</i>	121
Tabla 35. <i>Prueba 1 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	122
Tabla 36. <i>Prueba 2 – MEP – con H₂ vs sin H₂</i>	124
Tabla 37. <i>Prueba 3 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	125
Tabla 38. <i>Prueba 4 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	127
Tabla 39. <i>Prueba 5 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	128
Tabla 40. <i>Prueba 1 – MEP – con H₂ VS sin H₂</i>	130

Tabla 41. <i>Prueba 2 – MEP – con H2 VS sin H2</i>	131
Tabla 42. <i>Prueba 3 – MEP – con H2 VS sin H2</i>	133
Tabla 43. <i>Prueba 4 – MEP – con H2 VS sin H2</i>	134
Tabla 44. <i>Prueba 5 – MEP – con H2 VS sin H2</i>	136
Tabla 45. <i>Variación de datos CO2 – O2 prueba al mínimo</i>	137
Tabla 46. <i>Variación de datos CO2 – O2 prueba en aceleración</i>	139
Tabla 47. <i>Variación de datos Lambda - HC prueba al mínimo</i>	140
Tabla 48. <i>Variación de datos Lambda - HC prueba en aceleración</i>	142
Tabla 49. <i>Variación de datos Lambda – CO2 - HC prueba al mínimo</i>	143
Tabla 50. <i>Variación de datos Lambda – CO2 - HC prueba en aceleración</i>	145
Tabla 51. <i>Variación de datos CO – O2 prueba al mínimo</i>	146
Tabla 52. <i>Variación de datos CO – O2 prueba en aceleración</i>	148
Tabla 53. <i>Variación de datos Lambda – CO2 prueba al mínimo</i>	150
Tabla 54. <i>Variación de datos Lambda – CO2 prueba en aceleración</i>	152
Tabla 55. <i>Medición de opacidad sin hidrógeno</i>	153
Tabla 56. <i>Medición de opacidad con hidrógeno</i>	154
Tabla 57. <i>Variación de valores obtenidos</i>	155

Resumen

La investigación de la incidencia del sistema de inyección BI-FUEL y DUAL -FUEL de hidrógeno, en el control de emisiones de los motores de combustión interna analizó el proceso de combustión de la inyección de hidrógeno por aspersion en los vehículos de prueba, considerando los valores permisibles de concentración de HC, CO, Co₂, NOX y opacidad de los gases de escape según lo establecido por la normativa vigente en el país, de acuerdo a los métodos de ensayo para pruebas en ralentí y aceleración con test oficial y test continuo, a través del cual se evidencia una mejor combustión con una reducción de hidrocarburos debido las mejores características del hidrógeno especialmente referido al poder calorífico de este carburante en motores de encendido; en tanto; para motores de encendido por compresión, se realizó ensayos de opacidad por aceleración gobernada donde se presenta un ligero incremento, el mismo que se encuentra dentro de los valores permisibles acorde lo que establece la NTE INEN, de tal manera que justifica el uso del hidrógeno a través de generadores por electrolisis como método de enriquecer la mezcla aire combustible para el control de los niveles de polución producidos por fuentes móviles con motor de combustión.

Palabras clave: Hidrógeno, Bi-fuel, Dual-fuel, Emisiones de gases contaminantes

Abstract

The investigation of the incidence of the BI-FUEL and DUAL-FUEL hydrogen injection system, in the control of emissions from internal combustion engines, analyzed the combustion process of the hydrogen injection by aspersion in the test vehicles, considering the permissible values of concentration of HC, CO, Co2, NOX and opacity of exhaust gases as established by the regulations in force in the country, according to the test methods for tests at idle and acceleration with official test and continuous test, through which a better combustion is evidenced with a reduction of hydrocarbons due to the best characteristics of hydrogen, especially referring to the calorific value of this fuel in ignition engines; while; for compression ignition engines, opacity tests were carried out by governed acceleration where there is a slight increase, which is within the permissible values according to what is established by the NTE INEN, in such a way that it justifies the use of hydrogen at through electrolysis generators as a method of enriching the fuel-air mixture to control pollution levels produced by mobile sources with a combustion engine.

Keywords: Hydrogen, Bi-fuel, Dual-fuel, Polluting gas emissions

Capítulo I

Planteamiento del problema de investigación

Antecedentes

Debido a la creciente demanda de la industria automotriz, en el año 2021 se comercializaron alrededor de 119.316 vehículos en el Ecuador, representando un crecimiento del 39% con respecto al 2020, asimismo creció el consumo de combustibles fósiles progresivamente, generando altos niveles de gases contaminantes que afectan al medio ambiente. En el periodo 2010 – 2020, el parque automotor se incrementó en 1.134.826 vehículos, hasta alcanzar la cifra de 2.361.175, un crecimiento promedio anual del 6,8%. Datos que representan autos y camionetas considerados fuentes de movilidad de contaminación atmosférica (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2021).

En 1996 se crean las normas NTE INEN 2204 y 2207, referentes a la gestión ambiental que establecen los límites permitidos de emisiones de gases contaminantes para vehículos con motores de combustión interna MEC y MEP respectivamente (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

Se determina que los gases más contaminantes son los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbono (CO) siendo este último el gas más peligroso ya que no se puede distinguir ni oler, formándose cuando la mezcla de combustible es rica y no existe oxígeno suficiente para quemar completamente el combustible (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

La clasificación de los combustibles en el país depende del número octano que tenga cada uno; siendo estas, la gasolina extra con 87 octanos y la super con 93 octanos (equivalente al combustible premium), también se comercializa biocombustible (Eco país), a base de gasolina extra y un 5% de bioetanol compuesto de caña de azúcar que se

desempeña como combustible alternativo, para reducir los niveles de emisiones de gases contaminantes.

Desde esta perspectiva se ha buscado nuevas fuentes de energía que ayuden a mejorar la eficiencia de los MCI disminuyendo los niveles de emisiones de gases contaminantes bajo diferentes condiciones de carga. El hidrógeno es una solución viable, debido que al combustionarse no provoca la aparición de moléculas de carbono, siendo el único resultado la formación de vapor de agua. Además, al contar con un octanaje relativamente alto y tiempos de combustión cortos, al quemarse un kilogramo de hidrógeno puede obtenerse 142 *MJ* de energía, que equivale a 39 *kWh* (Llorca, 2010).

Los MCI son ineficientes, ya que al transformar la energía química a mecánica se quema el combustible en la cámara de combustión y sólo el 25% se utiliza para el movimiento del motor, mientras que el resto se disipa como calor (Hernández Sobrino et al., 2010).

Según el balance energético del 2020 el diésel y la gasolina son los combustibles fósiles de mayor demanda en el país con 31.4% y 26.5% respectivamente del total de energía consumida. También se indica que el sector dedicado al transporte consume 81.8% de 1.604 millones de galones de diésel producidos y 75.8% de 1.209 millones de galones de gasolina producidos, convirtiéndose en el sector que más combustibles fósiles consume (Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, 2020).

Se estima que un MCI que funciona con hidrógeno, puede alcanzar un rendimiento aproximado de entre 31% y 37%, el cual resulta de medir la energía mecánica a la salida del eje del motor y la energía entregada por el combustible medida sobre el poder calorífico (Hernández Sobrino et al., 2010).

Desde 2020 ha marzo del 2022, el Centro Nacional de Control de Calidad de Hidrocarburos de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No

Renovables ha estudiado 8.532 muestras de los combustibles: súper, extra, diésel y jet fuel; que fueron tomadas en estaciones de servicio, terminales y refinerías. Donde, del total de las muestras, 68 no cumplieron con las especificaciones técnicas, lo cual indica que únicamente el 0,8% no alcanzo las características establecidas por la INEN (Gobierno de la República del Ecuador, 2022).

Planteamiento del problema

A través del tiempo, el cambio climático ha sido afectado directamente por la emisión de gases resultantes de la quema de combustibles fósiles en los vehículos con motor de combustión interna tanto MEP como MEC, por tal motivo se busca combustibles alternativos capaces de disminuir el impacto a la contaminación ambiental.

Al utilizar un combustible con un alto potencial energético como el hidrógeno se obtiene una disminución de los niveles de emisiones de gases nocivos para la salud. Mediante el proceso de electrolisis del agua, se puede obtener hidrógeno y en combinación con un combustible fósil, disminuir los gases contaminantes producidos por los MCI.

Por lo que se han realizado estudios en los cuales se añade hidrógeno a la mezcla aire – combustible que ingresa al cilindro, mejorando su poder energético y de esta manera optimizando aspectos termodinámicos del proceso de combustión que resultan en la disminución de niveles de emisiones de gases de escape.

Varios de los estudios realizados con el hidrógeno como una fuente de energía alternativa para motores de combustión interna, se han realizado bajo diferentes condiciones de: régimen de revolución, tiempo de inyección, avance al encendido y dosado de la mezcla.

Debido al crecimiento del parque automotor y consecuentemente el aumento de las emisiones de gases contaminantes, se ha incursionado en nuevos métodos para mitigar estos agentes, por lo cual es necesario la búsqueda de técnicas que permitan mediante el

uso de combustibles alternativos la reducción del impacto medioambiental por parte de los MCI.

Los MCI durante el proceso de combustión no consumen toda la mezcla fresca que se introduce en ellos, y esta es expulsada con los gases de escape en forma de monóxido de carbono, hidrocarburos, plomo, dióxido de azufre y partículas de hollín, los cuales son esparcidos al ambiente.

Considerando lo anterior, es necesario establecer un proceso de diseño y manufactura de un equipo de electrólisis para la producción de hidrógeno mediante el uso de una solución apropiada (agua destilada/hidróxido de potasio), asimismo es indispensable realizar pruebas que expongan la incidencia de usar el equipo en fuentes móviles que utilizan MCI como unidad de potencia aportando a la investigación de energías alternativas que minimicen el impacto al medioambiente por parte de estas máquinas térmicas.

Justificación e importancia

La búsqueda de combustibles alternativos a los de uso convencional, ha tenido como objeto principal disminuir las emisiones contaminantes producidas tanto por los MEP como los MEC.

Con el aumento del parque automotor, es necesario aportar a la búsqueda y técnicas del uso de combustibles alternativos que ayuden a reducir los niveles de gases contaminantes generados por la quema de combustibles fósiles.

Es por tal motivo, que se plantea la implementación de un sistema de generación de hidrógeno, que permita añadir este gas en cantidades adecuadas a la mezcla aire/combustible que ingresa al cilindro mejorando el proceso de combustión de los motores MEC y MEP para consecuentemente disminuir el nivel de emisiones de gases de escape producidas por las fuentes móviles que utilizan estos motores.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Investigar la incidencia del sistema de inyección BI-FUEL y DUAL-FUEL de hidrógeno, en el control de emisiones de los motores de combustión interna de encendido por compresión.

Objetivos específicos

- Realizar la fundamentación teórica científica de la generación de hidrógeno por electrolisis del agua en oxihidrógeno que es una mezcla de hidrógeno atómico y oxígeno atómico en proporción de 2:1.
- Construir un reactor de hidrógeno por electrolisis del agua para la separación de las moléculas de oxígeno de las moléculas de hidrógeno.
- Implementar el sistema de inyección de hidrógeno por aspersion en motores de combustión interna, para el control de la contaminación en motores de automóvil con fuentes móviles.
- Ejecutar mediciones de emisiones considerando la normativa internacional de la SAE y nacional de la NTE INEN antes y después de la implementación del reactor y sistema de inyección de hidrógeno vehicular.
- Ejecutar mediciones de opacidad considerando la normativa internacional de la SAE y nacional de la NTE INEN antes y después de la implementación del reactor y sistema de inyección de hidrógeno vehicular.
- Analizar matemática, gráfica y estadísticamente los resultados obtenidos de las pruebas de emisiones y opacidad de la implementación del sistema de inyección de hidrógeno

Hipótesis

El uso del hidrógeno como mejorador de combustión ayudará en la reducción de los niveles de gases contaminantes en un 35% para motores con encendido provocado y para motores con encendido por compresión disminuirá los niveles de opacidad del 3-10%.

Variables de investigación

Para el presente proyecto se establecerán variables dependientes e independientes.

Variables dependientes

Emissiones de gases y opacidad en motores de combustión interna

Variable independiente

- Contaminación ambiental
- Sistema de inyección BI-FUEL y DUAL -FUEL de hidrógeno

Capítulo II

Fundamentación Teórica

La búsqueda de combustibles alternativos para los MCI ha llevado a estudiar al hidrógeno como fuente de energía, con el fin de utilizarlo como mejorador de combustión, disminuyendo las emisiones de gases contaminantes producidas por el uso de combustibles fósiles.

El hidrógeno se encuentra ubicado en el primer lugar de la tabla periódica, además de ser el elemento más ligero y abundante de la tierra debido a que se encuentra combinado molecularmente con el agua, y esta, constituye el 75% de la materia de la tierra, adquiriendo la propiedad de inagotable. Además, al hidrógeno se lo considera como un portador energético, capaz de liberar energía de forma controlada luego de someterse a procesos químicos y termodinámicos.

Un kilogramo de hidrógeno tiene la propiedad de liberar mayor energía a comparación de un kilogramo de cualquier tipo de combustible, ya que es 14.4 veces más ligero que el aire y su punto de condensación es a -252.77°C . Al combustionarse el hidrógeno gracias a su alto poder calorífico y su alta velocidad de inflamación se obtiene como resultado vapor de agua y bajos niveles de dióxido de carbono, disminuyendo el impacto ambiental (Aguer Hortal & Miranda Barreras, 2007).

El hidrógeno: propiedades y características

Características físicas y químicas

En estado gaseoso el hidrógeno es incoloro, inoloro, inofensivo y altamente inflamable, al combustionarse produce una energía mayor a comparación de los combustibles convencionales, emitiendo vapor de agua libre de CO_2 cuando el carburante es oxígeno puro.

A continuación, en la tabla 1 se presentan las características físicas del hidrógeno con sus equivalencias.

Tabla 1.

Características físicas del hidrógeno

Características	Equivalencia
Peso Molecular	2.016 <i>g/mol</i>
Peso Atómico	1.008 <i>g/mol</i>
Numero Atómico	1
Valencias	+1, -1
Densidad	0.0695 <i>kg/m³ (gas)</i> 0.070 <i>g/cm³(liquido)</i>
Punto de Fusión	-259.2°C (13.96°K)
Punto de Ebullición	-252.7°C (20.45°K)
Calor específico	3.388 <i>kcal/kg °C</i> (14047.6 <i>J/kg °C</i>)
Configuración Electrónica	1s ¹
Electronegatividad	2.1

Nota. En la tabla se muestra las características físicas del hidrógeno. Tomado de (Garcia Solis, 2013).

En condiciones normales el hidrógeno cuenta con un valor de combustión de 120 *MJ/kg* y una entalpia de -286 *KJ/mol*, capaz de inflamar hasta el 4% de hidrógeno, a bajas concentraciones de aire. Por otra parte, cuando el hidrógeno se almacena como gas a presiones aproximadas de 250 *bar* y a temperatura atmosférica, su relación de expansión a presión atmosférica es de 1: 240 (Fábrega Ramos, 2009).

Debido a estas características se le considera un vector energético. Que, a partir de otras fuentes energéticas, puede liberar una cantidad de energía mucho mayor. En su estado líquido, tiene un mínimo valor de masa, ya que debe someterse a muy bajas temperaturas para mantenerse en esa fase, por otro lado, en estado gaseoso, tiene un volumen 3.8 veces más grande que la gasolina.

Tabla 2.

Cuadro de comparación de las características del hidrógeno con otros combustibles

Propiedad	Unidad	H₂	Metano	Propano	Gasolina
Límite de inflamabilidad	%	4 – 75	5.3 – 15	2.1 – 10.4	1.4 – 7.6
Temperatura de combustión	°C	2318	2148	2385	2470
Mínima energía de encendido	<i>MJ</i>	0.02	0.29	0.305	0.24
Rango de detonación	%	18 – 59	6.3 – 13.5	3.4 – 35	1.1 – 3.3
Difusividad	<i>cm²/s</i>	0.61	0.16	0.1	0.05
Velocidad de combustión en el aire	<i>cm/s</i>	346	37 – 45	43 – 52	37 – 43
Valor calorífico	<i>kw – h/l</i>	0.003	8.9	0.026	8.8
	<i>kw – h/kg</i>	33.48	13.1	13.6	12.1
Densidad	<i>g/l</i>	0.0899	0.718	1.88	<i>Aprox. 4.4</i>
Octanaje	<i>Octanos</i>	130	125	105	87

Nota. En la tabla se muestra una comparativa de las características del hidrógeno con otros combustibles. Tomado de (Garcia Solis, 2013).

Propiedades Del Hidrógeno

Estructura Atómica. El hidrógeno está compuesto por moléculas diatómicas, es decir que solo cuenta con una órbita y un electrón que ayudan a la formación de estas, por otra parte, la masa atómica del hidrógeno es de **1.007940 kg/mol**, mientras que su masa molecular es de **2.01588 kg/kmol** y se encuentra concentrada en el núcleo.

Propiedades Físicas. Su punto de ebullición es de -252.7°C y su punto de fusión es de -259.2°C . Dado que tiene puntos de ebullición y fusión por debajo de los -73°C se considera al hidrógeno en estado líquido como líquido criogénico (Fábrega Ramos, 2009).

Continuando con el estudio de las propiedades químicas se compara el hidrógeno con otros gases y la gasolina en la tabla 3.

Tabla 3.

Comparativa de las propiedades físicas y químicas del hidrógeno.

Propiedades físicas y químicas del hidrógeno, metano, propano y gasolina					
Propiedad	Unidad	Hidrógeno	Metano	Propano	Gasolina
Poder calorífico	<i>MJ/kg</i>	120	50	46.3	44.5
Temperatura de autoignición	$^{\circ}\text{C}$	585	540	487	228 – 501
Temperatura adiabática de la llama de aire	$^{\circ}\text{C}$	2.045	1.875	1.925	2.197
Límites de inyección en aire	<i>% en vol</i>	4 – 75	5.3 – 15	2.1 – 10	1.0 – 7.6
Propagación de la llama en aire	<i>m/s</i>	2.65	0.4	–	0.4

Propiedades físicas y químicas del hidrógeno, metano, propano y gasolina					
Propiedad	Unidad	Hidrógeno	Metano	Propano	Gasolina
Coefficiente de difusión en aire	cm^2/s	0.61	0.18	–	0.05
Toxicidad	–	<i>No</i>	<i>No</i>	–	<i>> 55 ppm</i>
Reacción con oxígeno	–	<i>Negativo</i>	<i>Positivo</i>	–	<i>Positivo</i>

Nota. En la tabla se muestra una comparativa de las propiedades físicas y químicas del hidrógeno con respecto a otros gases y la gasolina. Tomado de (Gutiérrez Jodra, 2005).

En la tabla se puede observar que el límite de inyección y la propagación de la llama en el aire son superiores en comparación con la gasolina y los otros gases, por otro lado, se observa que la temperatura de autoignición es superior a la de la gasolina que da como resultado un alto índice de inflamabilidad y detonación por lo que se puede emplear como mejorador de combustión ayudando a la quema de una mezcla aire – combustible estequiométricamente pobre (Linares Hurtado & Moratilla Soria, 2007).

Propiedades químicas del hidrógeno

Reactividad. De la reacción química de hidrógeno con oxígeno se obtiene agua y calor que puede ser utilizada como trabajo útil. Para que ocurra dicha reacción debe existir un mínimo aporte de energía como el arco eléctrico producido por una bujía dentro del cilindro de un MCI.

La reacción del hidrógeno con oxígeno se considera un proceso reversible, pues si se dispone de agua y se aplica una cantidad de energía como la electricidad se puede obtener hidrógeno y oxígeno. Dando origen al principio de la electrolisis del agua con el cual se produce hidrógeno. (Fábrega Ramos, 2009)

Además, desde un aspecto medioambiental al utilizar hidrógeno como combustible se reduce la contaminación debido a que no contiene elementos carbonosos o sulfurosos que generen CO , CO_2 , SO_x y hollín durante su combustión (Fábrega Ramos, 2009).

Energía. A continuación, se define el contenido y la densidad energéticos del hidrógeno.

Contenido energético. Todo combustible al reaccionar con oxígeno libera una cantidad determinada de energía que se mide experimentalmente y se cuantifica como:

- Poder calorífico superior (HHV; del inglés *Higher Heating Value* que significa Valor Calorífico Superior)
- Poder calorífico inferior (LHV; del inglés *Lower Heating Value* que significa Valor Calorífico Inferior)

La diferencia entre estos dos es el calor de evaporación (cantidad de energía requerida para vaporizar un combustible líquido en gaseoso).

El hidrógeno, dispone de un HHV de 141,86 kJ/g (a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atm.); y de un LHV de 119,93 kJ/g (en las mismas condiciones anteriores). Además, este gas posee la relación peso – energía más alta que cualquier otro combustible ya que no tiene ningún átomo de carbono pesado. Es por esta razón, que la cantidad de energía liberada al reaccionar el hidrógeno es 2,5 veces el calor generado por la combustión de hidrocarburos más comunes (gasolina, diésel, metano, propano, entre otros) (Fábrega Ramos, 2009).

Densidad energética. A comparación con el contenido energético que indica la cantidad de energía en un determinado peso de combustible la densidad energética informa la cantidad de energía en un determinado volumen de combustible. Así, la densidad de energía es el producto del poder calorífico inferior (LHV) y de la densidad de un combustible

determinado. La densidad energética del hidrógeno es bastante pobre debido a que tiene una densidad muy baja. A continuación, se observa en la tabla la densidad de la energía de varios combustibles (Fábrega Ramos, 2009).

Tabla 4.

Densidad de la energía de varios combustibles

Combustible	Densidad de la energía (LHV)
	10050 kJ/m^3 ; gas a 1 atm. y 15°C
Hidrógeno	1825000 kJ/m^3 ; gas a 200 bar_g y 15°C
	4500000 kJ/m^3 ; gas a 690 bar_g y 15°C
	8491000 kJ/m^3 ; líquido
	32560 kJ/m^3 ; gas a 1 atm y 15°C
Metano	6860300 kJ/m^3 ; gas a 200 bar_g y 15°C
	20920400 kJ/m^3 ; líquido
Propano	86670 kJ/m^3 ; gas a 1 atm y 15°C
	23488800 kJ/m^3 ; líquido
Gasolina	31150000 kJ/m^3 ; líquido
Diesel	31435800 kJ/m^3 ; líquido
Metanol	15800100 kJ/m^3 ; líquido

Nota. En la tabla se muestra la densidad de energía de varios combustibles. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Inflamabilidad. Según Fábrega Ramos, (2009) son necesarias tres cosas para que se produzca fuego o una explosión:

1. Combustible (hidrógeno, por ejemplo)
2. Comburente (oxígeno, mezclado con el combustible en cantidades apropiadas)

3. Fuente de ignición (generalmente una chispa)

Punto de inflamación. Es la característica de un combustible de evaporarse para quemarse. Esta propiedad, define la temperatura mínima a la que se desprenden vapores inflamables suficientes para combustionarse a presión atmosférica. Es decir, que arden al entrar en contacto con una fuente de ignición, pero sin propagar la combustión a la masa líquida del combustible. Esta propiedad es muy distinta al punto de autoencendido, además debido a que el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso esta cualidad no tiene relevancia ya que este combustible se encuentra vaporizado (Fábrega Ramos, 2009).

A continuación, se presenta una tabla que muestra el punto de inflamación de algunos combustibles.

Tabla 5.

Punto de inflamación de algunos combustibles

Combustible	Punto de Inflamación
Hidrógeno	$< -253^{\circ}\text{C}$
Metano	-188°C
Propano	-104°C
Gasolina	Aproximadamente a -43°C
Metanol	11°C

Nota. En la tabla se muestra el punto de inflamación de algunos combustibles. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Rango de inflamabilidad. Son los límites en los cuales una cantidad determinada de combustible vaporizado puede admitir una llama y propagarla al mezclarse con aire para seguir quemando. Estos límites son:

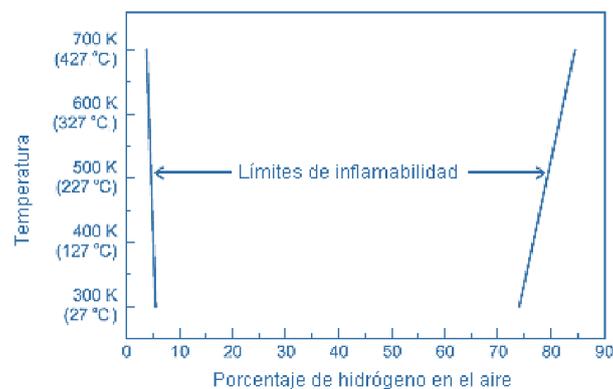
- Límite Superior (UFL; siglas del inglés *Upper Flammability Limit*), determina la máxima concentración de combustible vaporizado que puede admitir una llama y propagarla al mezclarse con aire para seguir quemando.
- Límite Inferior (LFL; siglas del inglés *Lower Flammability Limit*), determina la mínima concentración de combustible vaporizado que puede admitir una llama y propagarla al mezclarse con aire para seguir quemando.

Cuando se supera el UFL la concentración de oxígeno en la mezcla no es suficiente por lo que no permite la combustión, por otro lado, cuando se está por debajo del LFL la concentración de combustible es mínima ocasionando que la mezcla no pueda combustionarse.

Así mismo aparecen dos términos relacionados a lo mencionado anteriormente estos son: El límite inferior explosivo y el límite superior explosivo. Ambos determinan la concentración mínima y máxima respectivamente de un combustible vaporizado que puede ayudar a una explosión cuando este se mezcle con aire y se encienda (Fábrega Ramos, 2009).

Figura 1.

Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, con relación a la temperatura.

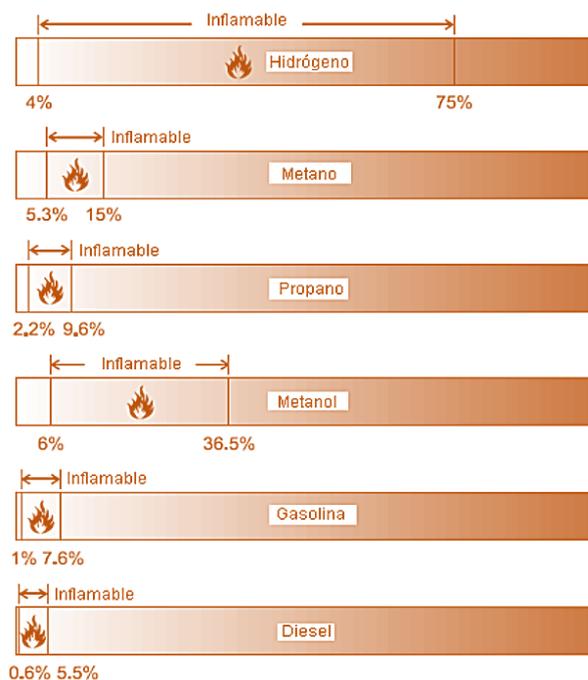


Nota. En la imagen se observa la variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno conforme cambia la temperatura a la que es expuesto. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

El rango de inflamabilidad del hidrógeno es muy amplio debido a que puede tener concentraciones en el aire entre el 4% a 75% y resulta explosivo en concentraciones de entre el 15% y el 59% a temperatura atmosférica estándar.

Figura 2.

Rango de inflamabilidad de varios combustibles.



Nota. En la imagen se observa los rangos de inflamabilidad de varios combustibles. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Temperatura de autoencendido. Es la temperatura a la cual el combustible puede inflamarse sin la necesidad de una fuente de ignición. El hidrógeno posee una temperatura de autoencendido elevada de 585°C. En la siguiente tabla se muestra una comparativa de la temperatura de autoencendido de algunos combustibles (Fábrega Ramos, 2009).

Tabla 6.*Temperatura de autoencendido de varios combustibles*

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	585°C
Metano	540°C
Propano	490°C
Metanol	385°C
Gasolina	230°C – 480°C

Nota. En la tabla se observa las temperaturas de autoencendido de varios combustibles.

Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Numero de Octano. Es la propiedad antidetonante de un combustible, el hidrógeno posee un numero de octano elevado, lo que lo hace resistente a detonaciones secundarias, aun cuando se realiza la combustión con mezclas muy pobres (Fábrega Ramos, 2009).

Tabla 7.*Numero octano de diferentes combustibles*

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	130
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diesel	30

Nota. En la tabla se observa el numero octano de diferentes combustibles. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Energía de ignición. Es la cantidad de energía externa que se necesita para encender una mezcla de combustible, dicha energía tiene que ser superior a la temperatura de autoencendido y durar tanto como para calentar el combustible vaporizado hasta la temperatura de ignición en los MCI los generadores de esta energía son las bujías. En el caso del hidrógeno su energía de ignición oscila los 0,02 MJ razón por la cual es propenso a inflamarse incluso si no hay una chispa visible (por los puntos calientes del motor) (Fábrega Ramos, 2009).

Velocidad de quemado. Esta propiedad indica la velocidad con la que la llama viaja a través de la mezcla aire – combustible, esta varía según la concentración de combustible a ambos extremos del rango de inflamabilidad del combustible. Ya que al exceder los límites la velocidad se anula, para el hidrógeno esta propiedad oscila entre **2,65 m/s** y **3,25 m/s**. De esta forma, una fuga de hidrógeno quemará rápidamente y, consecuentemente, su combustión tenderá a ser de breve duración (Fábrega Ramos, 2009).

Distancia de apagado. Es la propiedad que describe la distancia a la cual se extingue la llama de un combustible dentro de un MCI. Ya que para su medición se toma como referencia la pared del cilindro, debido a las pérdidas por calor. El hidrógeno tiene una distancia de apagado de **0,064 cm**, que es aproximadamente 3 veces menos que la distancia de apagado de combustibles comunes como la gasolina. Razón por la cual las llamas del hidrógeno son más difíciles de apagar por lo que estas circulan más cerca de las paredes del cilindro, aumentando la tendencia al petardeo o a que la llama de la mezcla aire – hidrógeno pase por una válvula entreabierta.

El hidrógeno como combustible

Luego de haber estudiado las distintas propiedades y características físicas y químicas del hidrógeno es propicio analizar cuáles de estas tienen relevancia a la hora de utilizar este gas como combustible.

En primer lugar, se tiene la amplia gama de inflamabilidad del hidrógeno que permite que este gas pueda ser utilizado en mezclas pobres estequiométricamente hablando, produciendo una reducción en el consumo y la temperatura alcanzada al final de la combustión, disminuyendo así el nivel de emisiones como los óxidos de nitrógeno que son expulsados a través del escape.

Luego, su baja energía de ignición que permite un encendido de la mezcla aire combustible con un mínimo aporte de energía de una fuente externa, por esta razón es necesario reducir los puntos calientes que podrían existir al interior del motor ya que estos podrían ocasionar la autoignición de este combustible gaseoso. Además, en motores que usan hidrógeno se opta por el cambio de bujías a unas de grado térmico frío y también se debe evitar las puntas de platino ya que promueve la ignición.

Otro factor para tener en cuenta al usar el hidrógeno como combustible es la pequeña distancia de apagado, pues debido a esta propiedad las llamas producto de la quema de mezcla aire/hidrógeno se acercan más a las paredes del cilindro lo que podría producir el retroceso de llama.

Este gas requiere de una elevada temperatura para que se produzca la autoignición cualidad que permite utilizar elevadas relaciones de compresión.

Finalmente, el hidrógeno al combustionarse bajo condiciones estequiométricas tiene una elevada velocidad de llama, permitiendo que el motor se acerque al ciclo térmico ideal aprovechando la mayor parte de energía térmica en trabajo útil.

Ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible

Ventajas. El hidrógeno debido a sus propiedades permite las siguientes ventajas como combustible.

- Alto poder calorífico y contenido energético principales ventajas que permiten obtener una elevada cantidad de energía con una mínima cantidad de gas. Un ejemplo de esto es que para obtener la misma energía útil de la combustión de un *1kg* de hidrógeno se requiere combustionar *8 kg* de gasolina.
- Se puede utilizar en motores de elevada relación de compresión debido a su alta temperatura de autoignición, permitiendo acercarse al ciclo térmico ideal de un MCI.
- Poca polución al ambiente ya que al reaccionar con oxígeno se produce vapor de agua y calor, se disminuye la cantidad de HC, CO₂, CO y NO_x que generalmente se producen por la quema de hidrocarburos.

Desventajas. La principal desventaja es su proceso de obtención y almacenamiento, debido a su densidad energética ya que tiene muy poca energía por unidad de volumen, tanto en estado gaseoso como líquido, además para obtener y almacenar este combustible en forma líquida los procesos y depósitos son muy costosos y complicados. Por otro lado si se plantea almacenar hidrógeno en estado gaseoso para un vehículo los contenedores deberían ser exageradamente grandes para alcanzar un rendimiento óptimo (Fúnez Guerra et al., 2010).

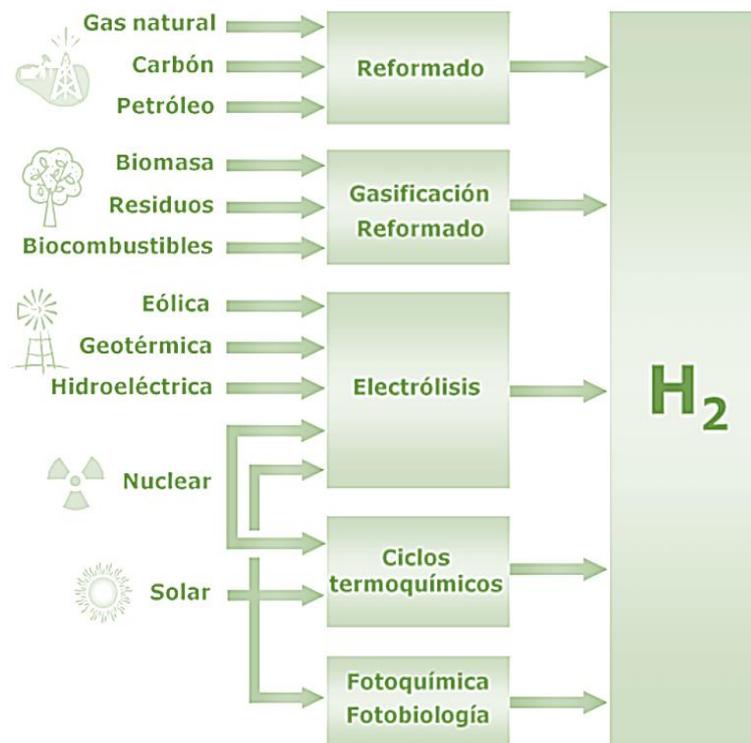
Métodos De Obtención De Hidrógeno Ventajas Y Desventajas

El hidrógeno se puede obtener por medio de procesos térmicos, electrolíticos y fotolíticos. De los cuales el método que se destaca es la electrolisis del agua, ya que es un proceso establecido para la obtención de este combustible alternativo que es amigable con el medio ambiente (Morlanés Sánchez, 2008).

Según Llorca, (2010) los métodos para producir hidrógeno son varios, distintos unos de los otros, esto se debe principalmente a la materia prima con la que se pretende descomponer el agua o al propio proceso de producción e incluso a la tecnología asociada.

Figura 3.

Mapa de varios procesos para la obtención de hidrógeno



Nota. En la imagen se observa los distintos procesos por los cuales se obtiene hidrógeno.

Tomado de (Llorca, 2010).

La mejor opción en relación con el medio ambiente sería la producción del hidrógeno con una energía limpia que utilice materias primas renovables como la biomasa cuyas emisiones de gases de efecto invernadero sean cercanas o iguales a cero o se utilicen fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica. Para que el hidrógeno tenga un gran auge en el mercado actual, debe ser competitivo en relación con las alternativas convencionales (GLP o GNC) en términos de coste (Telenchana Cuspa, 2018).

Otros aspectos importantes que marcan ventajas y desventajas sobre los métodos de obtención de hidrógeno son los costos de producción, los métodos de purificación y almacenamiento. Todo esto manteniendo un bajo impacto medioambiental.

Por ejemplo, el reformado de hidrocarburos es el principal método de bajo costo que se utiliza para producir hidrógeno. Por desgracia este proceso emite sustancias contaminantes y requiere el consumo de combustibles no renovables (Fábrega Ramos, 2009).

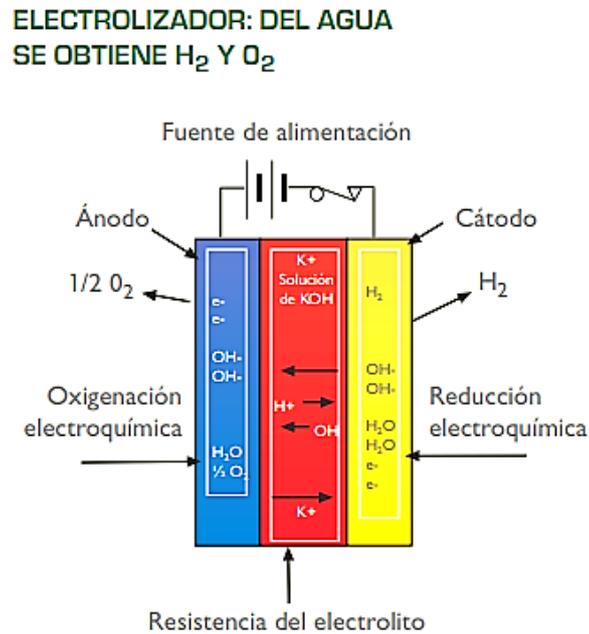
Otro proceso para extraer hidrógeno del agua se denomina electrólisis. En principio, este proceso no emite sustancias contaminantes al medio ambiente, además de ser un proceso irreversible, lamentablemente tiene el inconveniente de que requiere grandes cantidades de energía eléctrica, que sería sustentable solo si esta electricidad proviene de fuentes renovables (Fábrega Ramos, 2009).

Obtención Del Hidrógeno Por Electrolisis Del Agua

La electrolisis se define como, la descomposición de una sustancia por medio de la electricidad, este consiste en colocar dos electrodos (positivo y negativo) en una solución electrolítica (ionizable), luego mediante una fuente de energía hacer circular corriente directa por los electrodos, esto hará que los iones positivos de la solución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo separando las moléculas del compuesto. Aplicando este proceso a una solución caustica, los iones de oxígeno se mueven al ánodo, mientras que los iones de hidrógeno se desplazan hacia el cátodo (Telenchana Cuspa, 2018).

Figura 4.

Esquema del funcionamiento y elementos de un electrolizador de agua



Nota. En la imagen se observa el esquema del funcionamiento y elementos de un electrolizador de agua. Tomado de (Cabrera Pérez et al., 2008).

Uso Del Hidrógeno En Los Motores De Combustión Interna

Un MCI requiere de un combustible para poder realizar la conversión de energía térmica en energía mecánica, se ha realizado estudios donde el hidrógeno puede ser utilizado como un combustible único y como un mejorador de combustión.

Hidrógeno Como Combustible Único De Un MCI

Debido a las propiedades estudiadas del hidrógeno, este puede ser utilizado como un combustible único para los MCI siempre y cuando estos ofrezcan condiciones que permita el aprovechamiento de todos los beneficios que brinda este combustible.

Lamentablemente, los métodos de obtención y almacenamiento actuales no son viables para implementar su uso a nivel comercial en vehículos de producción en serie.

Es por esta razón que el hidrógeno se plantea como un combustible del futuro ya que la tecnología actual no permite que este sea un reemplazo definitivo a los hidrocarburos de uso común.

Hidrógeno Como Mejorador De La Combustión De Un MCI

Debido a las complejidades que se tienen para usar el hidrógeno como combustible único, se opta por aprovechar sus propiedades en el proceso de combustión de los MCI tanto MEP como MEC.

Esto se logra mediante la combinación del hidrógeno con los hidrocarburos mediante la suministración de este gas en el colector de admisión, logrando que ingrese una cantidad de hidrógeno en conjunto con la mezcla aire combustible permitiendo una mejora en las características de la combustión, disminuyendo la cantidad de emisiones contaminantes al ambiente.

Siendo así, una alternativa para mejorar los parámetros de rendimiento de un motor que utiliza combustibles fósiles desde el aspecto termodinámico y de impacto ambiental.

Kit De Generación De Hidrógeno Para Vehículos Con MCI

Definición

Este kit cuenta con generador de hidrógeno para vehículos con MCI es un reactor que basa su funcionamiento en el principio de electrolisis del agua, que utiliza la energía eléctrica de la batería del sistema de carga para generar hidrógeno a partir de una solución electrolítica con la finalidad de ser utilizado como mejorador del proceso de combustión.

Componentes

Existen varios tipos de kits de generación de hidrógeno para uso vehicular en este apartado se describen los componentes del generador de celda seca que se utiliza en esta investigación.

Este kit está conformado por los componentes que se observa en la imagen.

Figura 5.

Kit de generación de hidrógeno



Nota. En la imagen se observa los componentes del kit de generación de hidrógeno utilizado en la investigación. Tomado de (ABSOLUTENERGIES, 2016).

1. Generador de hidrógeno de celda seca
2. Tanque multifuncional para electrolito
3. Decantador
4. Conductos
5. Cables de conexión eléctrica
6. Terminales ojo de pez
7. Sunchos de plástico

Funcionamiento

El funcionamiento de este kit se puede observar en la siguiente imagen, en la cual se describe el recorrido del gas y el electrolito a través de los componentes mediante las conexiones.

Figura 6.

Funcionamiento del kit de generación de hidrógeno en un MCI



Nota. En la imagen se observa cómo se genera HHO y su circulación a través de los componentes del kit hasta llegar al motor. Tomado de (ABSOLUTENERGIES, 2016).

Como se observa, en primer lugar, se tiene que llenar el tanque multifuncional con la solución electrolítica (agua / hidróxido de potasio), que va a ser enviada por gravedad hacia el generador de celda seca.

Este debe estar conectado a la batería del vehículo, para ser alimentado con corriente eléctrica necesaria para la electrolisis de la solución, generando el gas HHO.

Este gas se envía nuevamente por el tanque multifuncional el cual tiene una toma sobre la solución electrolítica hacia el decantador donde los residuos de solución serán atrapados.

Finalmente, el gas HHO puro se enviará al colector de entrada de aire del motor para ingresar al cilindro juntamente con el aire permitiendo así ser quemado en la combustión del ciclo de funcionamiento del motor.

Combustión

La combustión es un proceso termodinámico, que describe la quema de una mezcla aire – combustible. En los MCI, estudiarlo es importante para mejorar los factores que intervienen en este proceso, con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes y aprovechar la mayor cantidad posible de masa de mezcla combustionada en la generación de trabajo útil.

En esta sección se abarca el proceso de combustión en MEP y MEC.

Combustión MEP

En el caso de los motores MEP la mezcla aire – gasolina se quema bajo el principio de combustión premezclada, que consiste en la homogenización de la masa de aire que ingresa al cilindro con una cantidad determinada de gasolina, durante la fase de admisión. Siempre y cuando el tipo de inyección del motor sea convencional y no directa. Sin embargo, las fases de la combustión son similares en ambos casos, asimismo los dos requieren del aporte de energía de otra fuente, en este caso, el arco eléctrico generado entre los electrodos de una bujía (Payri & Desantes, 2011).

A continuación, se presentan las fases de la combustión de los motores MEP:

Fase 1. Esta fase inicia cuando el arco eléctrico inicia la ignición de la mezcla comprimida en la cámara de combustión, formando lo que se conoce como núcleo el cual va creciendo poco a poco hacia la mezcla sin quemar aumentando la presión al interior de la cámara, aquí empieza la fase dos.

Fase 2. En esta fase conocida como la eclosión de la llama se da la propagación de esta a una alta velocidad, debido a las altas temperaturas alcanzadas de la mezcla sin quemarse por el incremento de presión.

Fase 3. En esta última fase la llama propagada inicia su ralentización debido a que empieza a combustionarse el resto de mezcla y las llamas se acercan a las paredes del cilindro. Esta finaliza cuando la combustión haiga terminado.

Combustión MEC

Para los motores MEC la mezcla aire – diésel se quema bajo dos principios el anteriormente estudiado y la combustión por difusión, en el cual el diésel y el aire están separados hasta el final de la fase de compresión, además en este tipo de combustión, se inicia cuando el diésel es pulverizado a alta presión directamente hacia el aire comprimido provocando su autoencendido.

A continuación, se presentan en tres fases distintas como se realiza la combustión en motores diésel.

Fase 1. En esta fase conocida como retraso al autoencendido se da la inyección a alta presión del diésel para que inicie la homogenización con el aire que ingreso al cilindro en la fase de admisión, aquí no se libera calor.

Fase 2. En esta fase debido a las altas temperaturas por la presión generada en la cámara de combustión, las partículas de oxígeno que se han homogenizado con el diésel vaporizado dan paso al autoencendido de la mezcla iniciando la combustión premezclada con todas sus fases antes descritas, liberando calor abruptamente lo cual genera el ruido característico de los motores diésel.

Fase 3. Las fases anteriores en conjunto se conocen como la combustión por difusión temprana, pero al terminar la combustión premezclada con la propagación de la

llama se da la combustión por difusión tardía que termina de combustionar la mezcla remanente, es decir, la que no ha sido combustionada en la fase dos terminando así la combustión de los motores diésel.

Emisiones

Debido a que los MCIAs requieren de la quema de un combustible para liberar calor y aprovecharlo como energía útil, el resultado de este proceso son los gases de escape que pueden ser nocivos y no nocivos, detallados a continuación.

Gases Nocivos

Son aquellos que afectan a la capa de ozono y son dañinos para la salud, estos son:

Hidrocarburos (HC). Son generados por las partículas de combustible que no se quemaron en el proceso de combustión.

Monóxido De Carbono (CO). Producto de una combustión incompleta de una mezcla rica, la insuficiencia de O_2 no permite formar CO_2

Óxidos Nitrosos (NO_x). Se produce por dos factores, cuando la mezcla es pobre y existen altas temperaturas, el O_2 sobrante se une a los nitrógenos presentes en el aire generando este gas nocivo.

Gases No Nocivos

Son aquellos que no afectan a la salud ni dañan la capa de ozono, son dos el Oxígeno (O_2) y el Dióxido de Carbono (CO_2).

Emisiones Vehículos Gasolina

Los vehículos que utilizan gasolina generalmente debido a su ciclo de operación luego de la combustión emiten HC , CO , O_2 , CO_2 y NO_x (bajo ciertas condiciones de carga). Estas emisiones están limitadas a nivel internacional por distintas normativas; pero, en el

país la normativa vigente para el control de estas emisiones es la NTE INEN 2204, además estas emisiones pueden ser medidas con un analizador de gases de escape se estudiará más adelante.

Emisiones Vehículos Diésel

En los vehículos diésel debido a las propiedades de su combustible y a su ciclo de funcionamiento se emite en menor cantidad los HC, pero lamentablemente generan mayor proporción de NOx y CO con respecto a los vehículos gasolina, otro producto de su ciclo de funcionamiento es el Hollín. Todos estos gases están normados a nivel internacional bajo estándares EURO la más actual la numero 6, en el país los límites máximos permitidos se establecen en la norma NTE INEN 2207, además el nivel de contaminación producido por los motores diésel se puede medir mediante un opacímetro que trabaja bajo la ley de Beer Lamber.

Ley De Beer Lamber. Esta ley establece la ecuación útil para medir el humo diésel, esta “expresa la relación entre la opacidad de una corriente de humo, la longitud de trayectoria óptica efectiva a través de la corriente, y la opacidad del humo por unidad de longitud de trayectoria” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a).

$$T = \frac{\text{Luz transmitida}}{\text{Luz incidente}} = e^{-KL}$$

$$N = 100(1 - e^{-KL})$$

En donde:

- T = transmitancia
- K = densidad del humo
- N = Opacidad
- L = longitud de trayectoria óptica efectiva

Densidad Del Humo (K). “Es una función del número de partículas de humo por unidad de volumen de gas” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a) que se expresa de la siguiente manera:

$$K = -(1/L) \ln(1 - N/100)$$

En donde:

- K = densidad del humo m^{-1}
- N = Opacidad en porcentaje
- L = longitud de trayectoria óptica efectiva en m

Relación Aire Combustible, Gases De Escape Y Rendimiento Del Motor

Los Gases De Escape Y La Relación Aire Combustible

Los gases de escape están estrechamente vinculados a la relación aire combustible que ingresa al motor previa a la combustión, ya que la composición y concentración de las emisiones de escape dependen de la proporción de aire y combustible que ha sido quemada al interior del motor.

Determinar la proporción con la cual el aire y combustible ingresan al motor mediante mediciones por separado del aire y combustible que ingresa al motor es muy complejo en un MCI instalado en un vehículo, por lo que se realiza un análisis químico a los gases emitidos por el tubo de escape mediante un analizador en el caso de los MEP y un opacímetro en el caso de los MEC, ambos serán estudiados posteriormente.

El rango de error para la determinación de la relación aire combustible mediante el análisis de gases de escape es del 3% cuando se realizan varios ensayos, lo cual es aceptable para muchos cálculos de ingeniería.

El Rendimiento Del Motor Y La Relación Aire Combustible

Definitivamente la relación aire combustible incide en el rendimiento del motor, por ejemplo, al tener una relación estequiométricamente pobre el rendimiento disminuirá, pero la economización del combustible aumentará, de igual manera en el caso de tener una relación rica la potencia aumentará al igual que el consumo.

Análisis De Los Productos De La Combustión

En el laboratorio se utiliza el aparato Orsat el cual consta de una bureta medidora y una serie de pipetas de absorción para mezclas que contengan bióxido de carbono, oxígeno, o monóxido de carbono, sin embargo, se pueden añadir pipetas extras para otros gases.

En la actualidad los equipos utilizados para el análisis de los productos de la combustión están tecnológicamente avanzados tienen componentes eléctricos y electrónicos que son más precisos, como un analizador de gases y un opacímetro.

Normas Técnicas

NTE INEN 2202:2013

El objeto de esta norma es “establecer el método de ensayo para determinar el porcentaje de opacidad de las emisiones de escape de las fuentes móviles con motor a diésel mediante el método de aceleración libre” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a).

Dicho método, está basado en la cuantificación “del porcentaje de luz visible que se absorbe y refleja cuando un haz de ésta atraviesa la corriente de las emisiones provenientes del sistema de escape” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a). Además, se contempla el manejo de los equipos de ensayo, así como también la preparación del vehículo y las condiciones ambientales idóneas para la ejecución de la medición.

NTE INEN 2203:2013

El objeto de esta norma es especificar los métodos de medición y evaluación para las emisiones de gases de escape en motores de combustión interna de uso no motriz. Como por ejemplo, máquinas para el movimiento de tierras, generadores y otras aplicaciones (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013b).

NTE INEN 2204:2017

Esta norma fue creada para establecer “los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) que emplean gasolina”(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

NTE INEN 2207:2002

En esta normativa se “establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) de diésel” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002).

NTE INEN 2349:2003

“Esta norma establece los procedimientos que se deben seguir para la realización de la revisión técnica vehicular (RTV) obligatoria” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2003).

Aquí se puede encontrar los procedimientos y equipamientos con los cuales se ejecuta la revisión técnica por ejemplo la medición de emisiones de gases de escape y sus instrumentos de medición analizador de 4 gases, opacímetro, medidor de RPM, entre otros.

SAE J1667

Esta norma establecida por la Sociedad de Ingenieros de Automoción (*SAE International*) establece el procedimiento para medir las emisiones de gases mediante la técnica de aceleración brusca en vehículos de tipo pesado que utilizan diésel. También

determina especificaciones necesarias para el medidor de opacidad y la demás instrumentación utilizada (SAE International, 1996).

Equipos De Medición

Analizador De Gases Brain Bee Mahle AGS – 688

El analizador de gases de escape modelo AGS – 688 de la marca Brain Bee Mahle, es un analizador de 4 gases con capacidad de medir 5 con la conexión del opacómetro mediante su puerto OMNIBUS, este equipo mide y reporta automáticamente la concentración en volumen de CO , CO_2 , HC y O_2 emitidos por el tubo de escape. Adicionalmente puede complementarse sus funciones con la conexión de equipos externos para de igual manera medir y reportar el régimen del motor en RPM, factor lambda y temperatura de aceite.

A continuación, se ofrece una tabla donde se puede apreciar los rangos de medición del equipo.

Tabla 8.

Rangos de medición del analizador de gases de escape Brain Bee AGS – 688

Campos de medición					
CO	0	–	9.99	% vol	Res. 0,01
CO ₂	0	–	19.9	% vol	Res. 0,1
HC hexano	0	–	9999	ppm vol	Res. 1
O ₂	0	–	25	% vol	Res. 0,01
NO _x	0	–	5000	ppm vol	Res. 1
Lambda	0.5	–	5		Res. 0,001
Revoluciones					
Inductancia/Capacitancia	300	–	9990	rpm	Res. 10

Campos de medición					
Temperatura del aceite	20	–	150	°C	Res. 1

Nota. En la tabla se indica los rangos de medición del analizador de gases de escape Brain Bee AGS – 688. Tomado de (Brain Bee Workshop Solutions, 2014).

Figura 7.

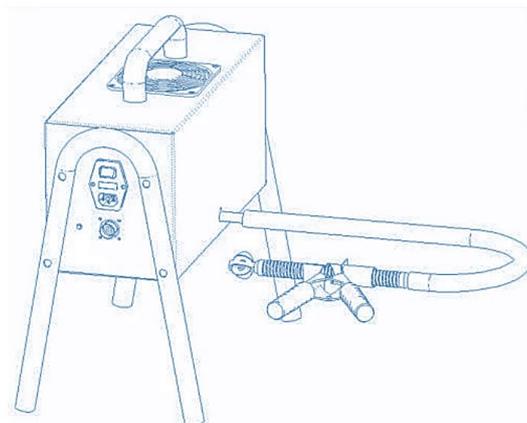
Analizador de gases de escape Brain Bee Mahle AGS – 688



Nota. En la imagen se observa el equipo para la medición de gases de escape modelo AGS – 688 de la marca Brain Bee Mahle utilizado en el presente proyecto. Tomado de (Brain Bee Workshop Solutions, n.d.-a).

Opacímetro Bear 57-220

El opacímetro modelo 57 – 220 de la marca Bear mide y reporta automáticamente a través de la interfaz en el monitor la opacidad del humo producido por lo vehículos con motor a diésel. Este equipo trabaja bajo especificaciones franceses NFR 10 – 025, además excede regulaciones internacionales basadas en las guías de medición europeas.

Figura 8.*Opacímetro Bear 57 – 220*

Nota. En la imagen se observa el equipo para la medición de opacidad para vehículos a diésel modelo 57 - 220 de la marca Bear utilizado en el presente proyecto. Tomado de (Cartek, 2007).

Tabla 9.*Escala de rango del equipo de opacidad Bear 57 - 220*

	Escala del rango		
N valor	0.00	–	99.9%
K valor	000	–	9.99 m ⁻¹

Nota. En la tabla se muestra los rangos de operación del opacímetro marca Bear modelo 57 – 220. Tomado de (Cartek, 2007).

Medidor De RPM MGT-300

Es un complemento para el analizador de gases que permite registrar el régimen del motor mediante los armónicos de la señal de carga de la batería, o mediante el sensor de vibración magnético, también cuenta con una termocupla para medir la temperatura del motor.

Figura 9.

Medidor de RPM MGT – 300 EVO



Nota. En la imagen se observa el equipo para medir RPM utilizado en la investigación.

Tomado de (Brain Bee Workshop Solutions, n.d.-b).

Capítulo III

Implementación del estudio

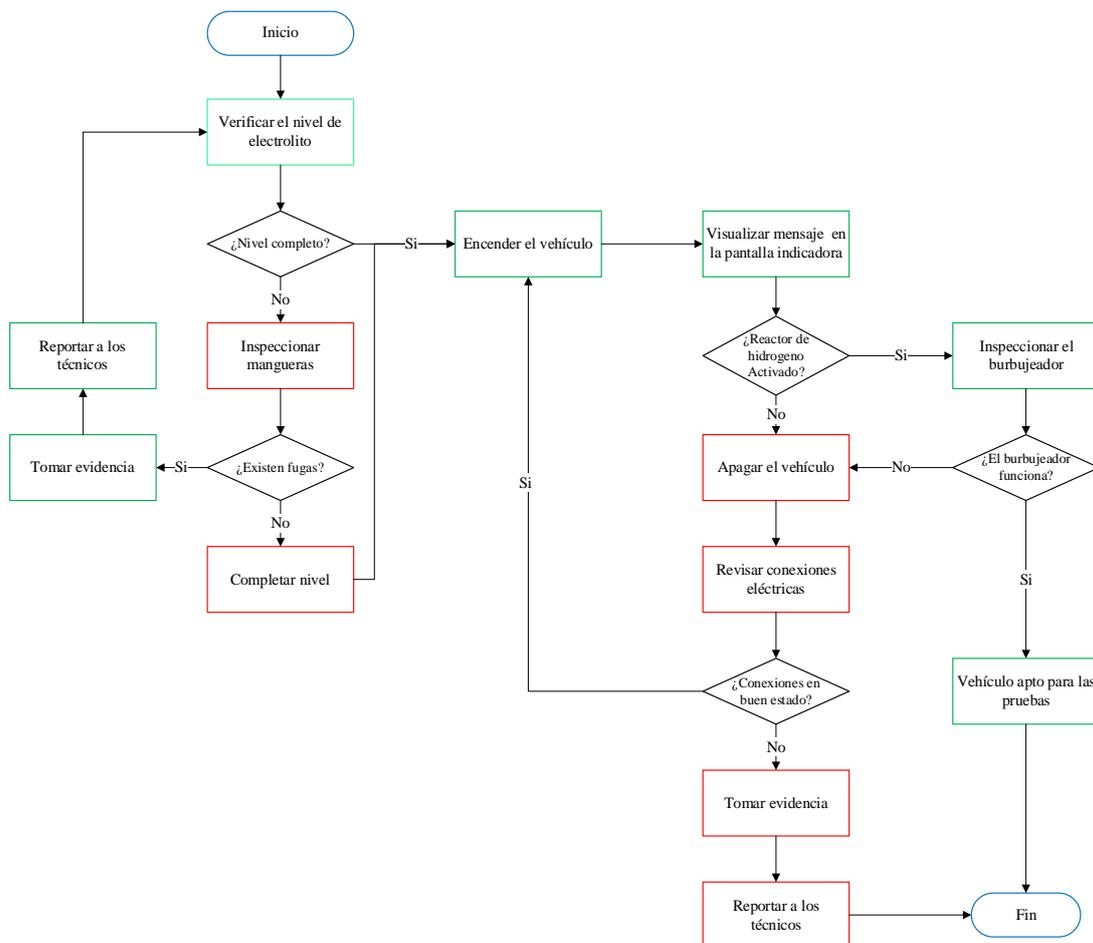
Modo de empleo del hidrógeno en vehículos

El hidrógeno vehicular producido por el kit, ingresa al colector de admisión tanto en los MEP como los MEC, por tal motivo el modo de empleo es el mismo para los dos vehículos de prueba.

A continuación, se observa el diagrama de flujo correspondiente al empleo y uso del hidrógeno en los vehículos de prueba.

Figura 10.

Protocolo para el uso del hidrógeno en los vehículos de prueba



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para verificar el funcionamiento del generador de hidrógeno.

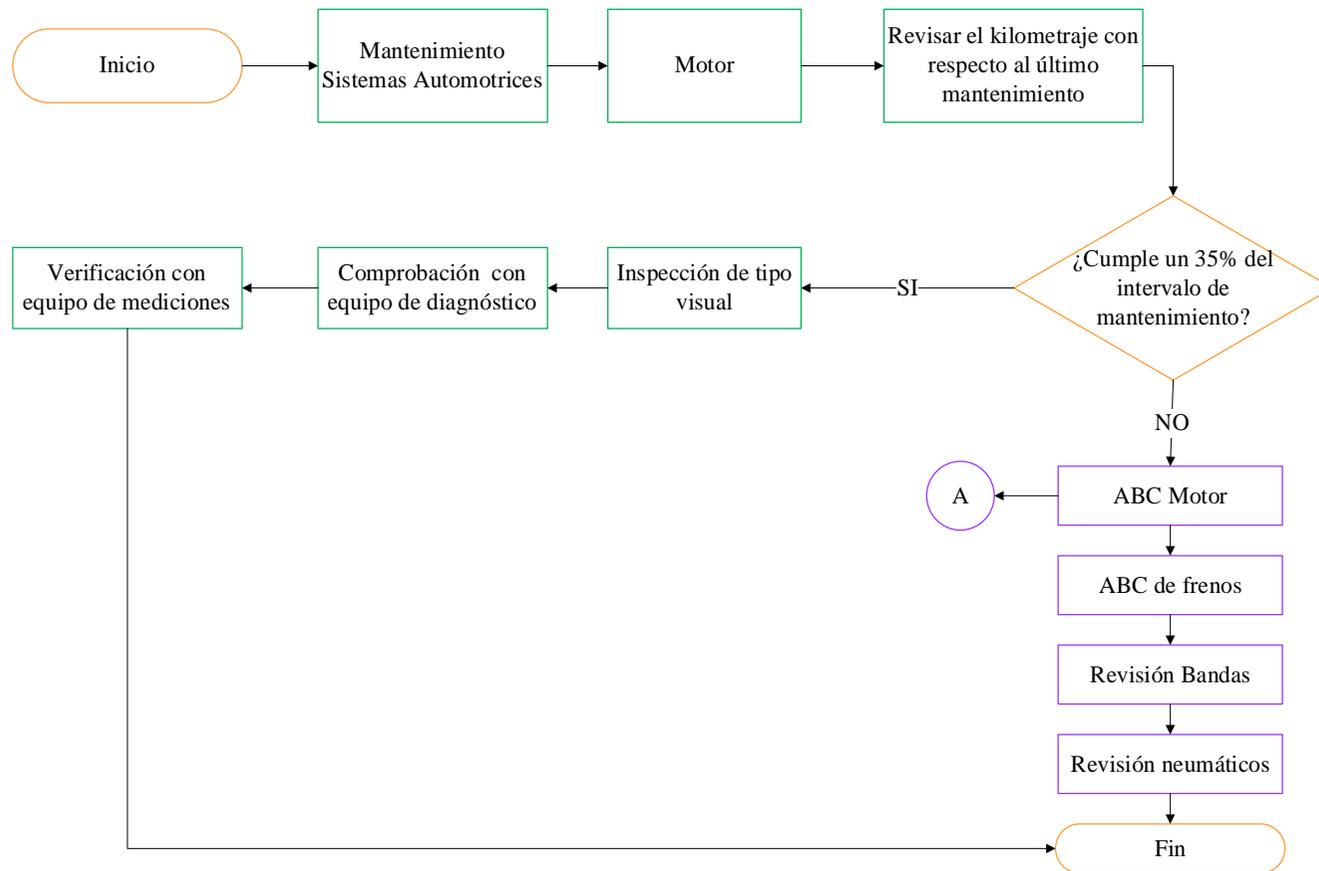
Puesta A Punto De Los Motores MEP Y MEC

Antes de realizar las pruebas de gases, es necesario que los vehículos de prueba se encuentren en óptimas condiciones de funcionamiento, para evitar anomalías en los datos obtenidos.

Para la puesta a punto de los vehículos se procede a realizar el mantenimiento preventivo en los sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Figura 11.

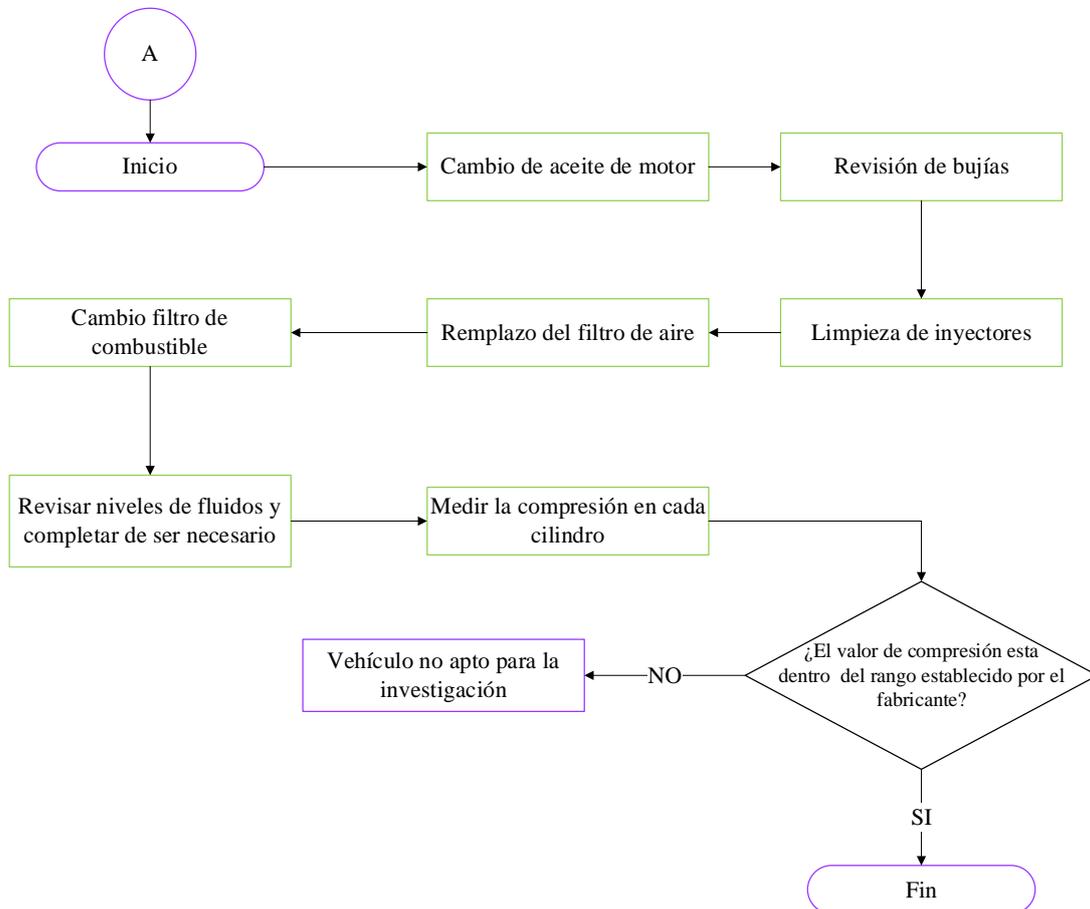
Protocolo para la puesta a punto del motor de los vehículos de prueba



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para realizar la puesta a punto de los motores de los vehículos de prueba (gasolina y diésel)

Figura 12.

Sección A del protocolo de la puesta a punto del motor de los vehículos de prueba



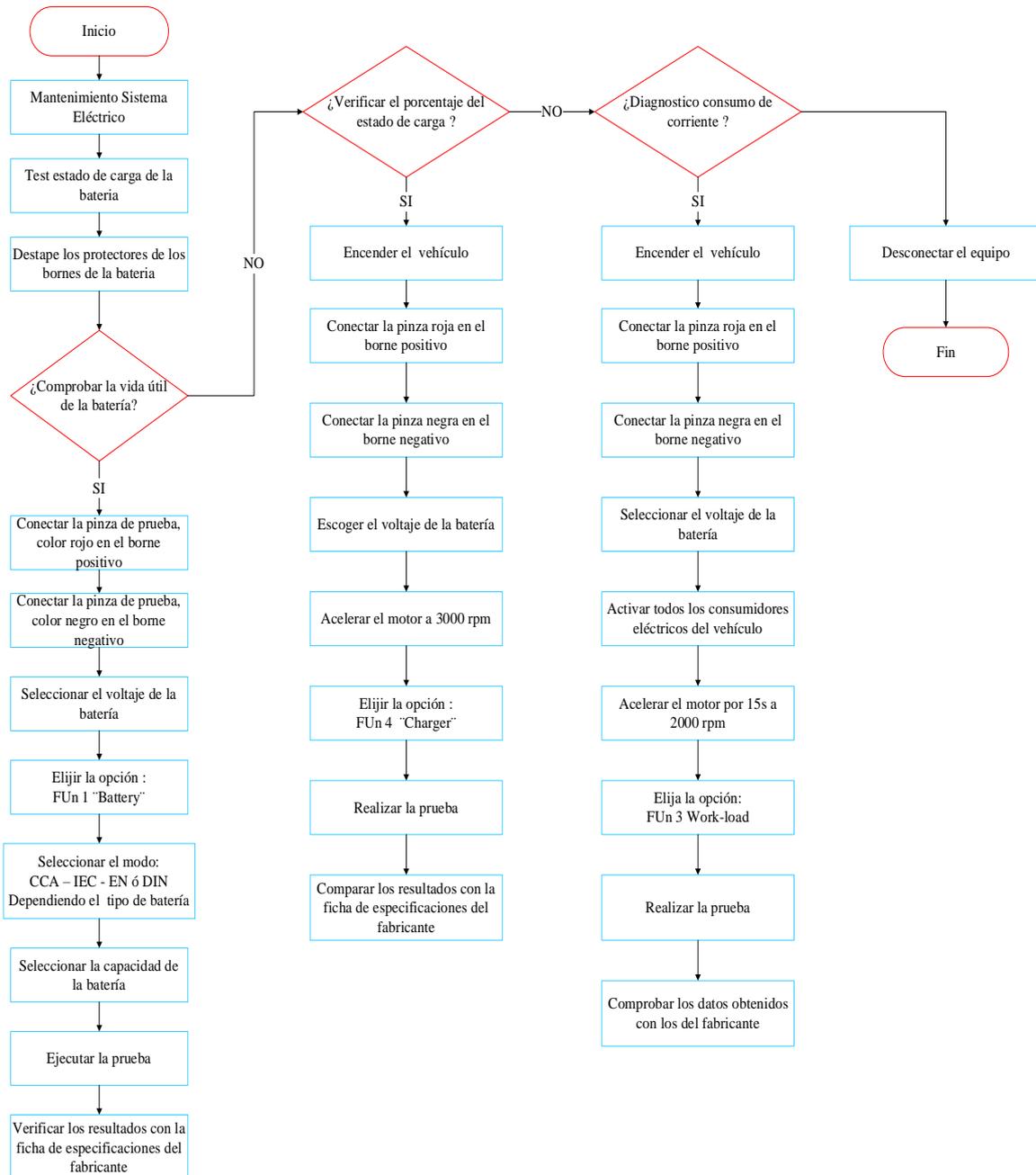
Nota. En la imagen se observa la sección A del diagrama de flujo para la puesta a punto del motor de los vehículos de prueba. Tomado de (gasolina - diésel).

Puesta A Punto Sistema Eléctrico Y Electrónico

Debido a que el kit de generación de hidrógeno requiere de utilizar la energía eléctrica del sistema de carga es necesario realizar la puesta a punto del sistema eléctrico de los vehículos de prueba.

Figura 13.

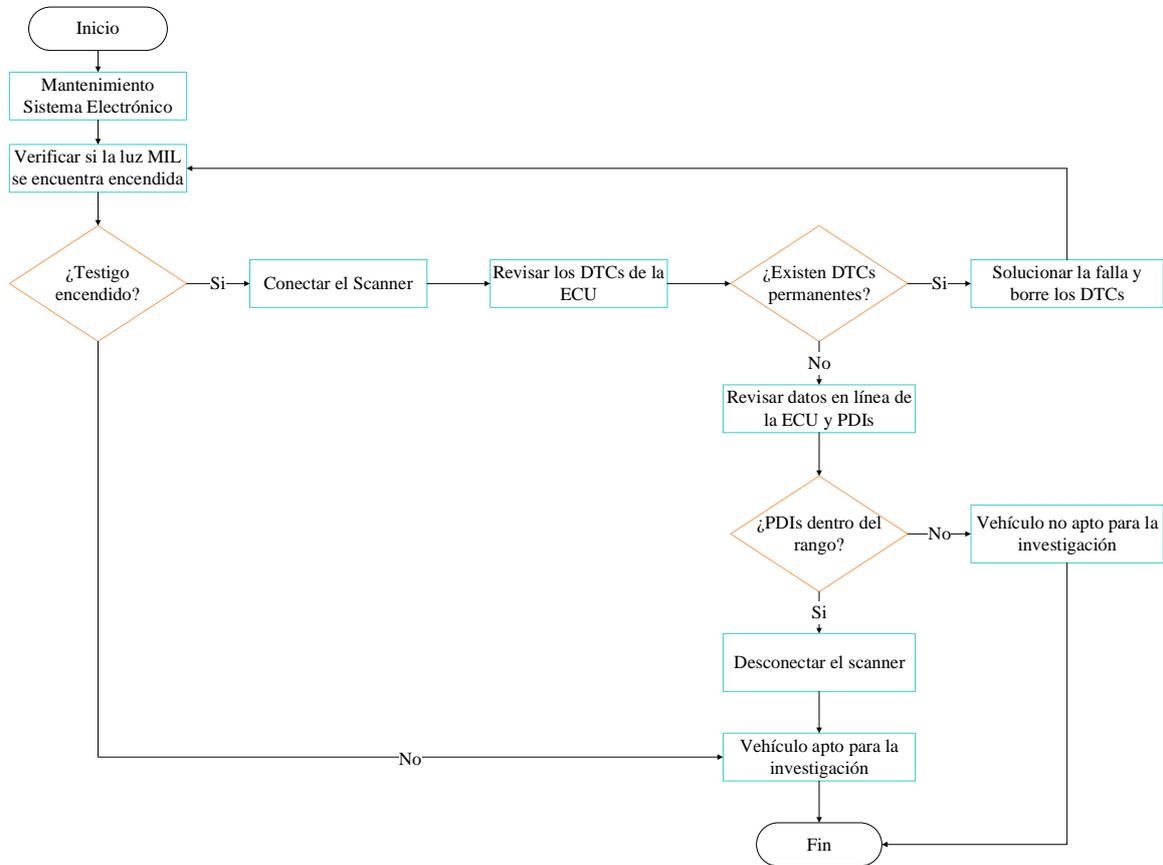
Protocolo puesta a punto sistema eléctrico



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para ejecutar la puesta a punto del sistema eléctrico de los vehículos de prueba.

Figura 14.

Protocolo puesta a punto del sistema electrónico



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para la puesta a punto del sistema electrónico de los vehículos de prueba.

Puesta A Punto MEC

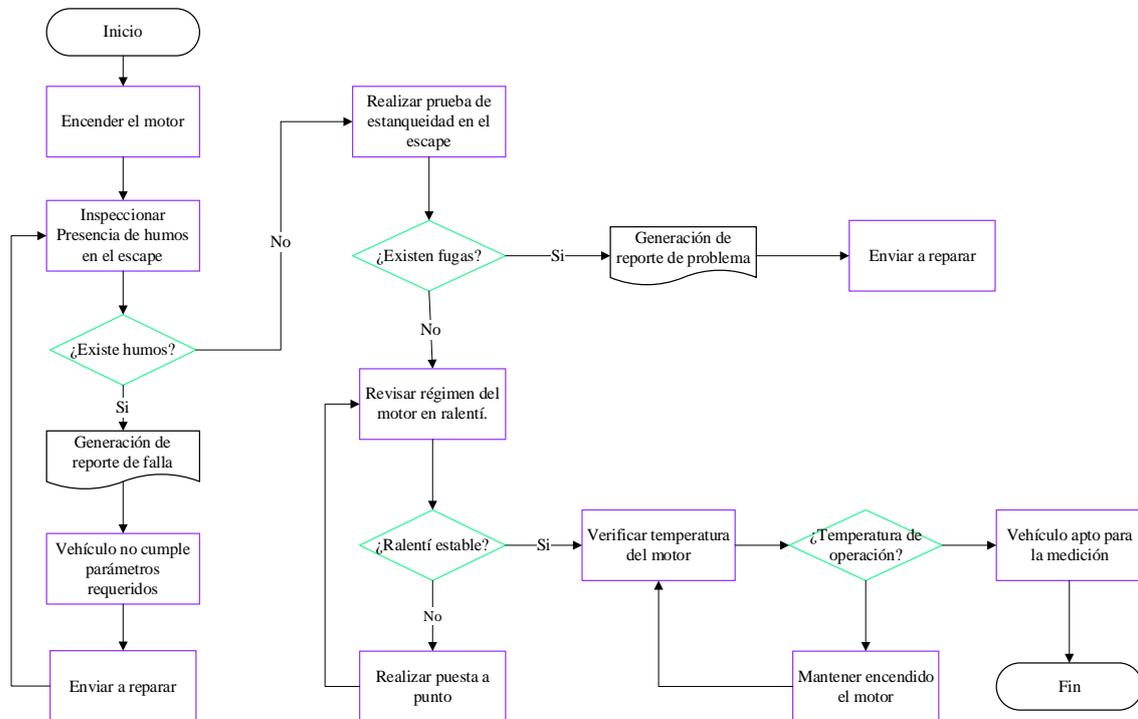
Uso De Los Equipos De Medición

Antes de utilizar los equipos de medición es necesario seguir el siguiente protocolo que permite verificar, que las condiciones del vehículo sean las idóneas para la utilización de los equipos.

El siguiente protocolo se estable para motores de combustión interna MEP como MEC.

Figura 15.

Protocolo para verificar las condiciones de operación del vehículo de prueba previo a la medición de gases de escape.



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para que el vehículo de prueba alcance condiciones ideales para ejecutar el estudio.

Uso Del Analizador De Gases

Luego de haberse ejecutado el protocolo para la verificación de las condiciones del vehículo antes de los ensayos y que estas sean optimas, se procede a utilizar el analizador de gases como se observa en la siguiente figura.

Figura 16.

Ubicación y uso del analizador de gases de escape en el vehículo de prueba

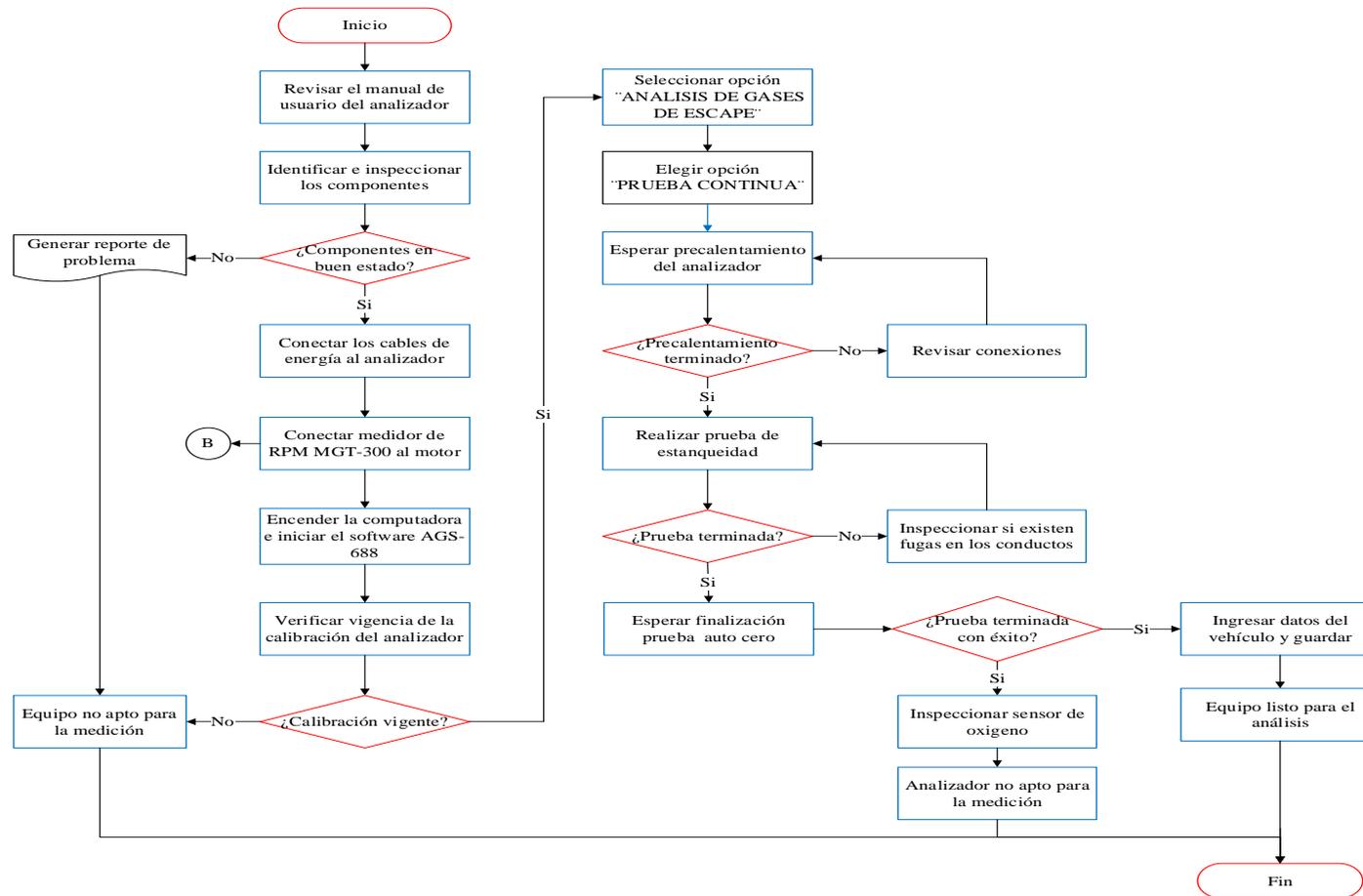


Nota: En la imagen se observa la interfaz del software del analizador de gases (izq.) y la colocación de la sonda de medición (der.) como parte de la ejecución del protocolo de uso del analizador de gases.

Para un correcto uso del equipo, se debe tomar en consideración el siguiente protocolo.

Figura 17.

Protocolo del uso del analizador de gases de escape



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para el correcto uso del analizador de gases de escape

Uso del opacímetro

Después de realizar la verificación de las condiciones previas al análisis y que estas sean optimas, se procede a utilizar el opacímetro como se indica en la figura.

Figura 18.

Forma de colocación del opacímetro en el vehículo de prueba

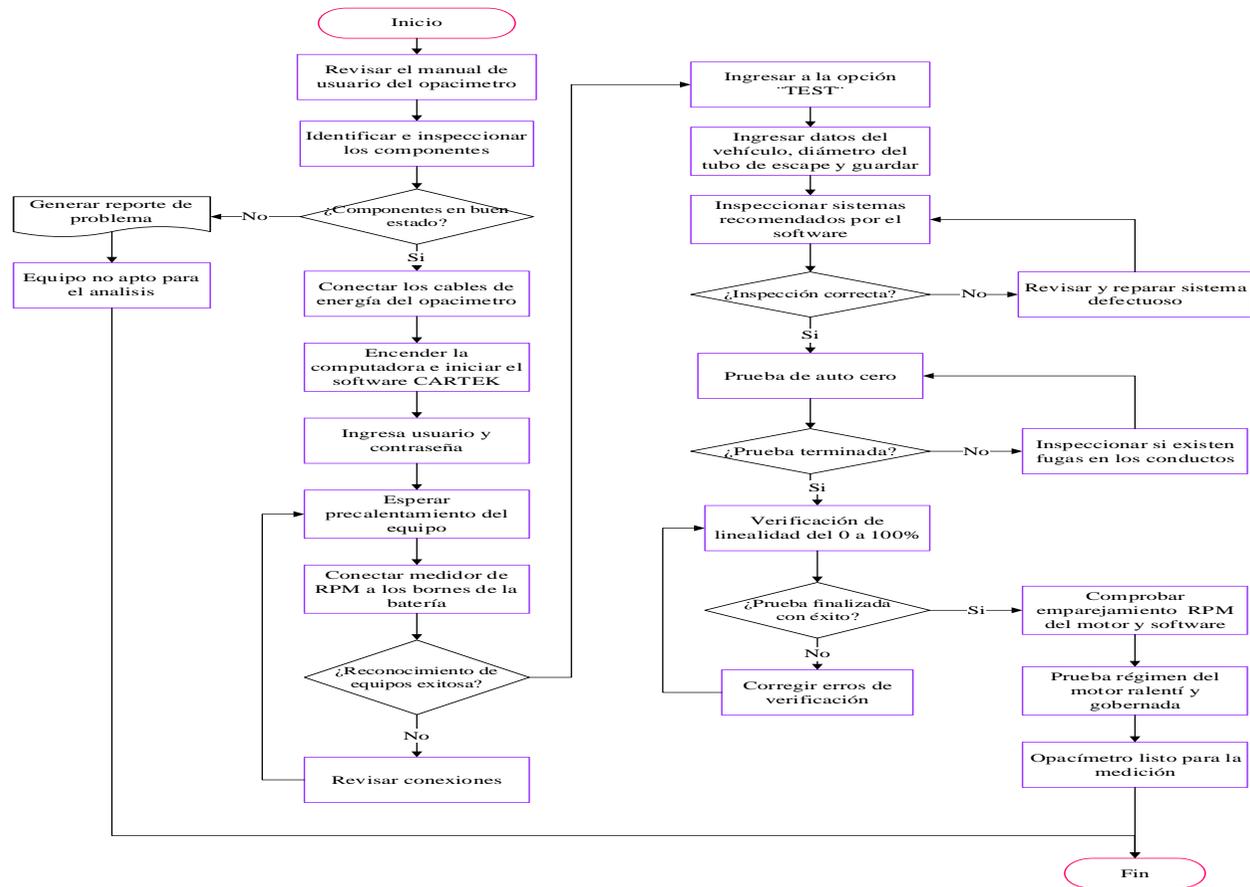


Nota. En la imagen se observa la forma correcta de ubicar la sonda de medición de opacidad en el vehículo de prueba.

Para un correcto uso del equipo se debe tomar en consideración el siguiente protocolo.

Figura 19.

Protocolo para el uso del opacímetro



Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el encendido y calibración del opacímetro antes de la medición.

Protocolos para la medición de emisiones de gases de escape

Antes de realizar los ensayos de emisiones y opacidad es necesario tomar en cuenta las condiciones ambientales determinadas por la NTE INEN 2349:2003, procedimientos de la revisión técnica vehicular, debido a que estos factores afectan en las pruebas.

Tabla 10.

Condiciones ambientales para las mediciones de gases

Parámetro	Requerimiento	
	Variable	Rango de medición
Condiciones ambientales de funcionamiento	Temperatura	5 – 40°C
	Humedad Relativa	0 – 90%
	Altitud	<i>Hasta 3000 msnm</i>
	Presión	500 – 760 mmHg

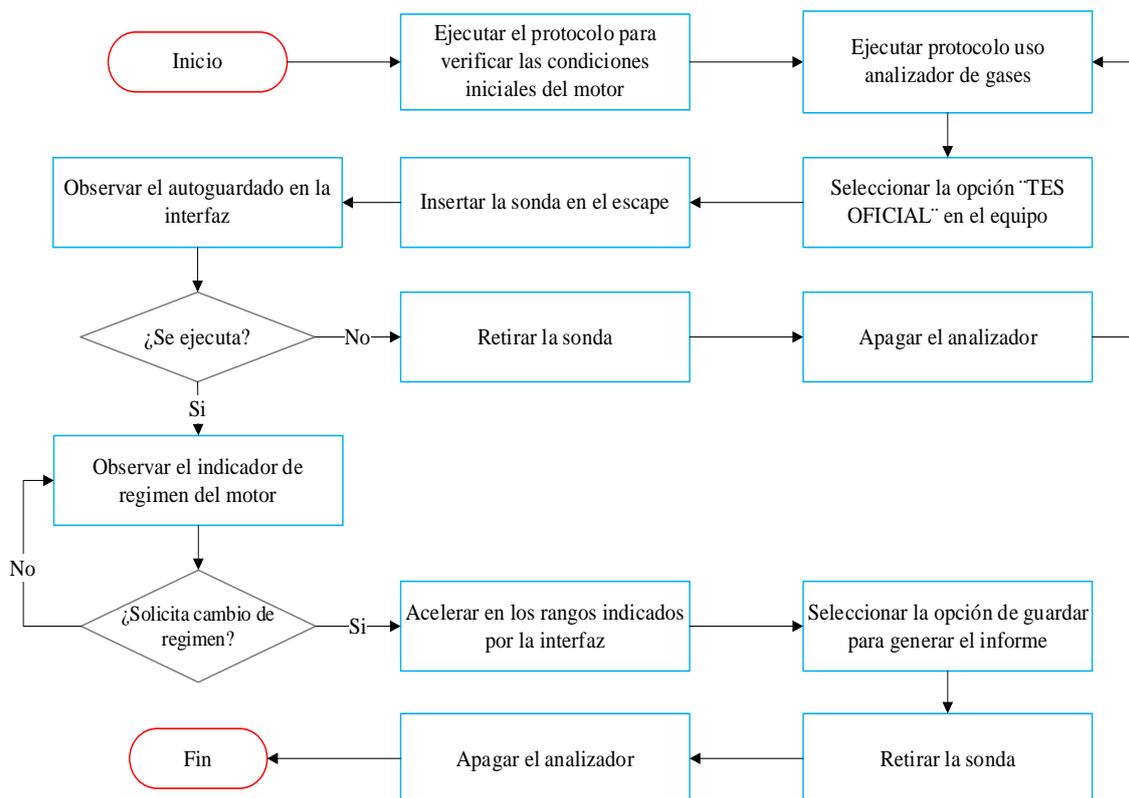
Nota. En la tabla se observa las condiciones ambientales requeridas para una correcta medición de gases de escape. Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2003).

Protocolo MEP Antes Y Después Del Uso De Hidrógeno

Antes del hidrógeno. Es necesario para el estudio realizar una medición de gases en el MEP del vehículo de prueba cuando no utiliza el generador de hidrógeno.

Figura 20.

Protocolo para ejecutar el análisis de gases de escape en el MEP sin hidrógeno.

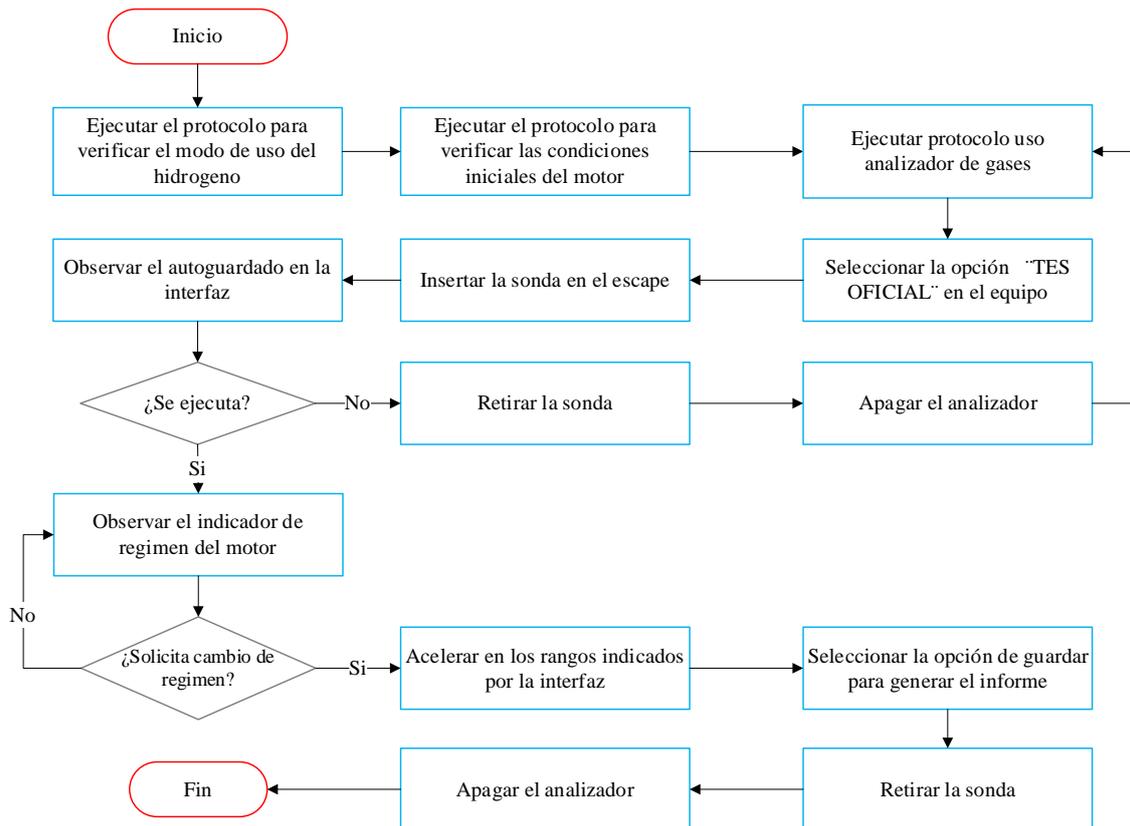


Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para medir los gases de escape antes del uso de hidrógeno.

Después del hidrógeno. Es necesario para el estudio realizar una medición de gases en el MEP del vehículo de prueba cuando utiliza el generador de hidrógeno.

Figura 21.

Protocolo para ejecutar el análisis de gases de escape en el MEP con hidrógeno.



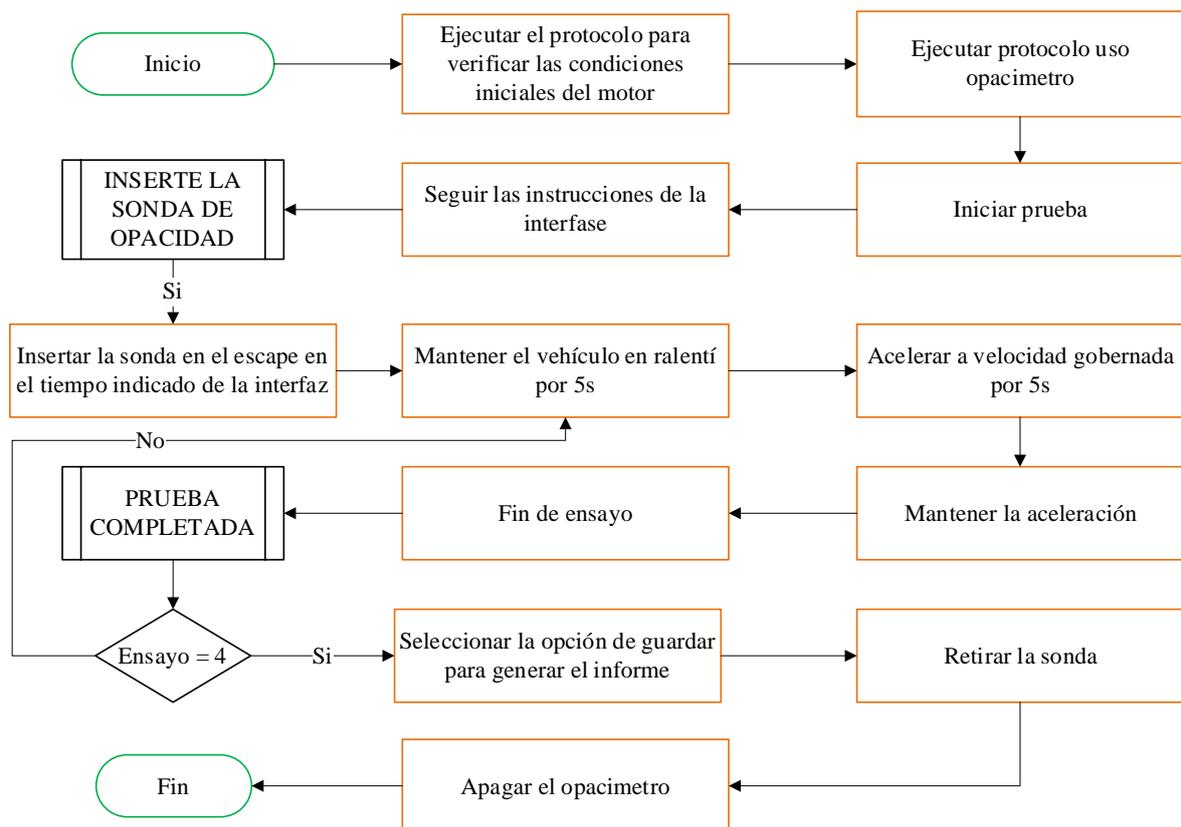
Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para medir los gases de escape cuando el MEP utiliza hidrógeno.

Protocolo MEC Antes Y Después Del Uso De Hidrógeno

Antes del hidrógeno. Es necesario para el estudio realizar una medición de opacidad en el MEC del vehículo de prueba cuando no utiliza el generador de hidrógeno.

Figura 22.

Protocolo para ejecutar el análisis de opacidad en el MEC sin hidrógeno.

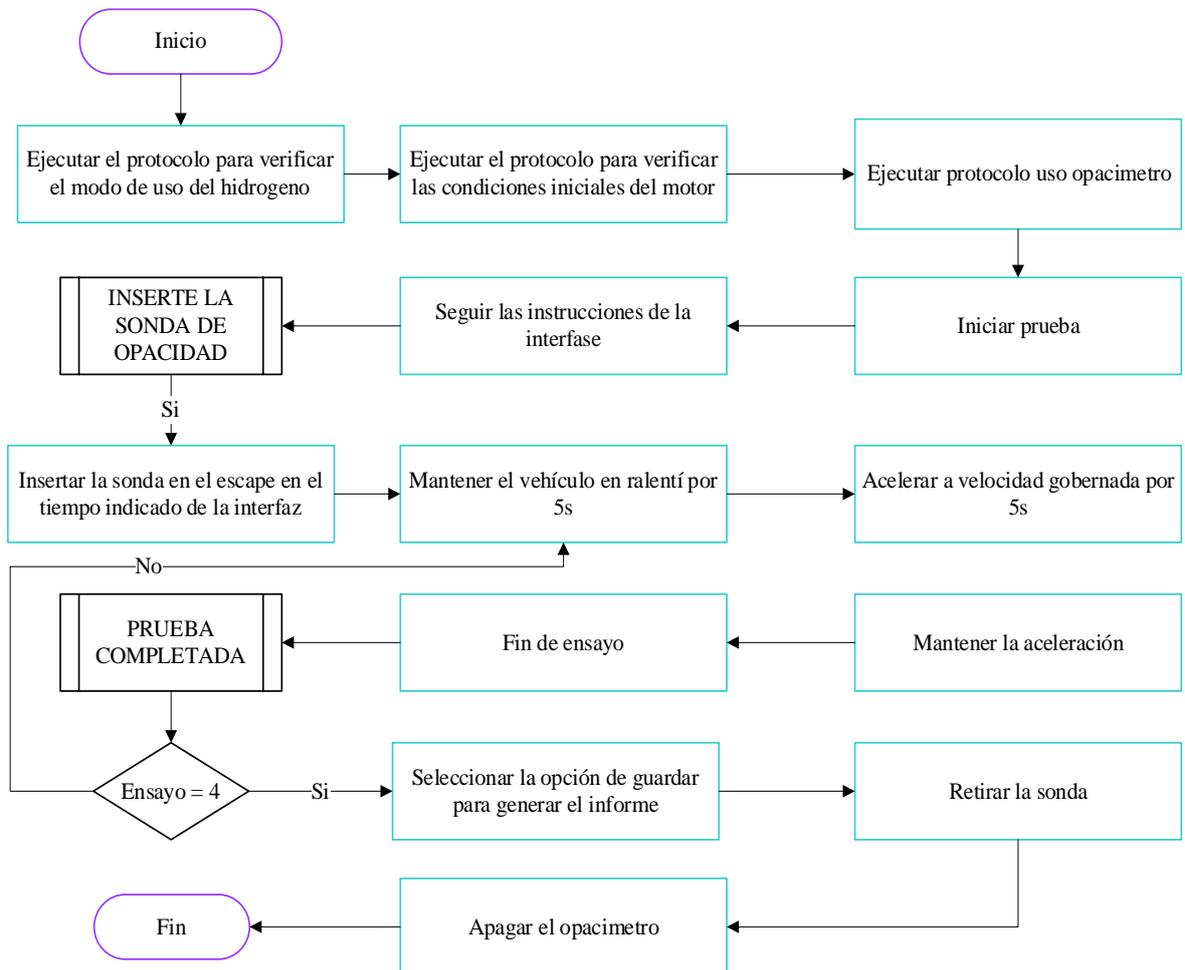


Nota. En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para realizar el análisis de la opacidad en el vehículo diésel antes del uso de hidrógeno.

Después del hidrógeno. Es necesario para el estudio realizar una medición de opacidad en el MEC del vehículo de prueba cuando utiliza el generador de hidrógeno.

Figura 23.

Protocolo para ejecutar el análisis de opacidad en el MEC con hidrógeno.



Nota: En la imagen se observa el diagrama de flujo que indica el procedimiento para realizar el análisis de la opacidad en el vehículo diésel cuando utiliza hidrógeno.

Ejecución de los protocolos

Prueba de emisiones de gases de MEP

Para esta prueba, se van a realizar 5 ensayos de emisiones en dos condiciones test oficial y prueba continua, que estarán bajo los protocolos estandarizados por las normativas NTE INEN 2203 y 2204.

Test oficial. Para este ensayo se ejecutarán pruebas con un régimen de giro, en ralentí y a 2500 RPM, donde se tendrá como resultado los límites prescritos y los valores medidos.

Para ello es necesario, ejecutar el protocolo de verificación de condiciones iniciales del motor y seguidamente el protocolo de uso del analizador de gases.

Una vez que el vehículo y el analizador se encuentren en condiciones óptimas para la ejecución de la medición se debe proceder de la siguiente manera:

- Seleccionar en la interfaz la opción test oficial, donde se van a ingresar los datos del vehículo.

Figura 24.

Interfaz del analizador de gases de escape



Nota. En la imagen se observa la interfaz del software del equipo analizador de gases de escape.

- Una vez que, en el equipo aparezca la interfaz donde se observa los gases medidos, temperatura del motor y el régimen de giro, se puede continuar con la medición.

Figura 25.

Interfaz para el test oficial – prueba al mínimo



Nota. En la imagen se observa la interfaz del software del equipo cuando este se encuentra listo para el test oficial – prueba al mínimo.

- Insertar la sonda en el tubo de escape

Figura 26.

Ubicación de la sonda en el tubo de escape del vehículo de prueba



Nota. En la imagen se observa la ubicación de la sonda de medición en la salida del escape

- Para la prueba en ralentí se debe esperar 20 segundos a que las lecturas se estabilicen, donde el régimen de motor debe encontrarse entre 500 – 1200 RPM

Figura 27.

Lectura de las emisiones en ralentí.



Nota. En la imagen se observa la interfaz del software del equipo cuando se realiza la medición de emisiones en ralentí.

- Trascendido este tiempo, la interfaz dará un aviso, para realizar la prueba de aceleración donde por un periodo de 20 segundos el régimen del motor deberá mantenerse entre 2400-2600 RPM.

Figura 28.

Lectura de las emisiones a 2500 RPM



Nota. En la imagen se observa la interfaz del software del equipo cuando se realiza la medición de emisiones a 2500 RPM

- Al terminar el ensayo la interfaz dará un aviso de guardar para generar el informe.

Figura 29.

Reporte emitido por el software del equipo al terminar la prueba de Test Oficial

		TEST OFICIAL GASES DE ESCAPE	
ANALIZADOR GASES		TACÓMETRO	
Número de Serie	: 160513000054	Número de Serie	:
Número de Homologación	: OM00292EST006cNET	Número de Homologación	:
Fecha vencimiento calibración	: 12/07/2023	Fecha vencimiento calibración	:
DATOS TALLER			
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPEL			
BELISARIO QUEVEDO		0987507064	
LATACUNGA		laquiroz@espe.edu.ec	
DATOS DEL VEHICULO			
Placa	: PBO-9678	No. Chasis	: KNAPB811AB7057593
Marca	: KIA	No. Tubos de Escape	: 1
Modelo	: SPORTAGE R 2.0L 4X2 GSL MT	2 Tiempos / 4 Tiempos	: 4
Año de Construcción	: 2011	Odómetro	: 130280
Combustible	: GASOLINA		
LIMITES PRESCRITOS			
Temperatura Motor	: 80 [°C]	Régimen Motor en Aceleración	: 2400 - 2600 [1/min]
Régimen Motor al Mínimo	: 500 - 1200 [1/min]		
O2	: 5.0 [%Vol]	CO	: 1.0 [%Vol]
		HC	: 200 [ppmVol]
VALORES MEDIDOS			
PRUEBA AL MINIMO		PRUEBA EN ACELERACIONE	
Temp. Motor	: 91 [°C]	Temp. Motor	: 91 [°C]
RPM	: 690 [1/min]	RPM	: 2490 [1/min]
CO	: 0.03 [%Vol]	CO	: 0.40 [%Vol]
CO2	: 14.7 [%Vol]	CO2	: 14.5 [%Vol]
O2	: 0.53 [%Vol]	O2	: 0.42 [%Vol]
HC	: 44 [ppmVol]	HC	: 72 [ppmVol]
Lambda	: 1.023 [-]	Lambda	: 1.005 [-]
RESULTADO DEL TEST : APROBADO SIN FALTAS			
Fecha y hora de inicio prueba	: 25/07/2022	15:10:58	
Fecha y hora de termine prueba	: 25/07/2022	15:13:34	
Examinador	: LEONIDAS QUIROZ		
Firma			

Nota. En la imagen se observa el formato con el cual el equipo reporta el resultado de la medición de emisiones luego de la prueba del test oficial.

Prueba continua. Para este ensayo, se tomará los valores de los niveles de emisiones en diferentes regímenes de giro del motor: ralentí, 1000, 2000, 3000 y 4000 RPM.

Con el vehículo de prueba y el analizador en óptimas condiciones, se debe proceder de la siguiente manera:

- Seleccionar en la interfaz la opción de prueba continua y registrar los datos del vehículo.

Figura 30.

Interfaz de inicio de la prueba continua



Nota. En la imagen se observa la pantalla del software que indica el inicio de la prueba continua.

- Ingresar la sonda en el escape

Figura 31.

Colocación de la sonda de medición a la salida del escape para la prueba continua



Nota. En la imagen se observa la ubicación de la sonda de medición para la prueba continua.

- Primera prueba en ralentí, seleccionar la opción de F1, para general el informe.

Figura 32.

Interfaz prueba continua – ralentí



Nota. En la imagen se observa la adquisición de datos de la prueba continua – ralentí.

- Segunda prueba régimen de giro a 1000 rpm, seleccionar la opción de F1, para general el informe.

Figura 33.

Interfaz prueba continua – 1000 RPM



Nota. En la imagen se observa la adquisición de datos de la prueba continua – 1000 RPM

- Tercera prueba régimen de giro a 2000 rpm, seleccionar la opción de F1, para general el informe.

Figura 34.*Interfaz prueba continua – 2000 RPM*

Nota: En la imagen se observa la adquisición de datos de la prueba continua – 2000 RPM

- Tercera prueba régimen de giro a 3000 rpm, seleccionar la opción de F1, para general el informe.

Figura 35.*Interfaz prueba continua – 3000 RPM*

Nota. En la imagen se observa la adquisición de datos de la prueba continua – 3000 RPM

- Al terminar el ensayo de prueba continua se obtiene el siguiente informe que se presenta a continuación.

Figura 36.

Reporte emitido por el software del equipo al terminar la medición de prueba continua

 ANÁLISIS GASES ESCAPE		
ANALIZADOR	AGS-688	CUENTARREVOLUCIONES
Número de serie	: 160513000054	Número de serie
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPEL		
BELISARIO QUEVEDO		0987507064
LATACUNGA		laquiroz@espe.edu.ec
Datos del vehículo:		
Marca	: KIA	Modelo
Matricula	: PBQ-9678	No. Chasis
Combustible	: GASOLINA	Km recorridos
		: 129434
Valores relevados:		
Temp. motor	[°C]	: 91
RPM	[1/min]	: 650
COcorr	[%Vol]	: 0.04
Lambda	[-]	: 1.008
CO	[%Vol]	: 0.04
CO ₂	[%Vol]	: 15.2
HC	[ppmVol]	: 71
O ₂	[%Vol]	: 0.27
NO	[ppmVol]	: 0
Fecha y hora prueba	: 15/07/2022	08:38
Sello		
Firma		

Nota. En la imagen se observa el formato con el cual el equipo reporta el resultado de la medición de emisiones luego de la prueba continua.

Prueba de opacidad de MEC

Para esta prueba se va a realizar 5 ensayos de opacidad y emisiones de NO_x que estarán regidos por los protocolos establecidos de acuerdo con las normativas NTE INEN 2202 y 2207, basadas el ensayo de aceleración libre.

Prueba de opacidad. Consiste en 4 ensayos de aceleración libre, es decir llevar al motor de ralentí a velocidad gobernada progresivamente, en cuatro ocasiones, cada una de 5 segundos consecuentemente, obteniendo como resultado la opacidad promedio de los ensayos.

Para ello es necesario, ejecutar el protocolo de verificación de condiciones iniciales del motor y seguidamente el protocolo de uso del opacímetro.

Figura 37.

Conexión y verificación del uso del opacímetro



Nota. En la imagen se observa la interfaz del opacímetro (izq.) y comprobación del funcionamiento (der.) del equipo.

Una vez que el vehículo y el opacímetro se encuentren en condiciones óptimas para la ejecución de la medición se debe proceder de la siguiente manera:

- Seleccionar en la interfaz la opción de iniciar prueba e insertar la sonda de opacidad en el escape en el tiempo establecido por el equipo.

Figura 38.

Interfaz para el inicio de la prueba y colocación de la sonda

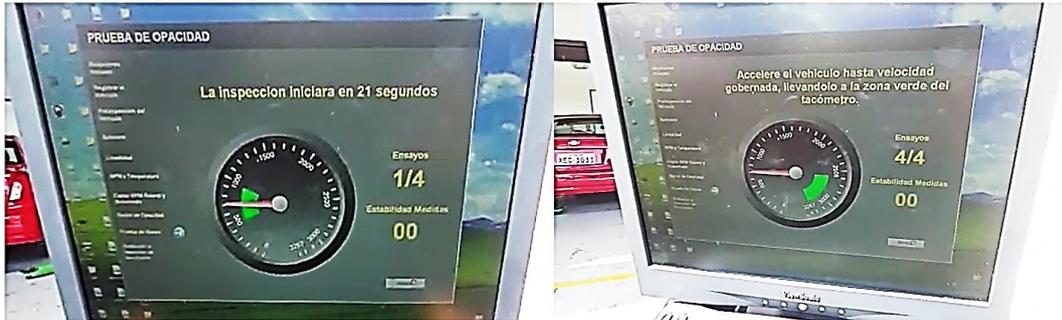


Nota. En la imagen se observa la interfaz para iniciar la prueba (izq.) y la ubicación de la sonda para la medición de opacidad (der.) en el vehículo de prueba.

- En esta fase se realizarán 4 ensayos, cada ensayo estará conformado por una medición en ralentí y consecuentemente una medición a velocidad gobernada.

Figura 39.

Ejecución de la medición de opacidad de los distintos ensayos



Nota. En la imagen se observa las mediciones de opacidad de los distintos ensayos.

- Una vez finalizado los 4 ensayos se obtiene el informe de resultados de una prueba que se guarda en la carpeta seleccionada.

Figura 40.

Reporte generado por el software de control del opacímetro al terminar la prueba

<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 40px; margin-bottom: 5px;"></div> ESPE LATACUNGA Tel: 0000000		Email:
DATOS DEL CLIENTE NOMBRE: ALAN APELLIDO: ORTIZ IDENTIFICACION: 1723815831		DATOS DEL VEHICULO PLACA: PCR-3801CH MODELO: 2016 MARCA: CHEVROLET LINEA: DMAX NUMERO DE MOTOR: VIN: 8LBETF3T7G0383922 DIAM. EXHOSTO: 57.00
PRUEBA ENSAYO: 3.33 % PRUEBA 1: 2.31 % PRUEBA 2: 3.15 % PRUEBA 3: 2.71 % OPACIDAD: 2.72 % FECHA Y HORA DE LA PRUEBA 8/9/2022 14:11:45	DISPOSITIVO DE MEDICION 8181 RPM RALENTI 705 RPM RPM GOBERNADA 4367 RPM TEMPERATURA DE OPACIDAD 0 ° NORMA OPACIDAD LIMITE: 15.00 % MOTIVO:	
RESULTADO: APROBADA		

OPERARIO RESPONSABLE: _____

LEONIDAS QUIROZ

<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 40px; margin-bottom: 5px;"></div> ESPE LATACUNGA Tel: 0000000		Email:
DATOS DEL CLIENTE NOMBRE: ALAN APELLIDO: ORTIZ IDENTIFICACION: 1723815831		DATOS DEL VEHICULO PLACA: PCR-3801CH MODELO: 2016 MARCA: CHEVROLET LINEA: DMAX NUMERO DE MOTOR: VIN: 8LBETF3T7G0383922 DIAM. EXHOSTO: 57.00
PRUEBA ENSAYO: 3.33 % PRUEBA 1: 2.31 % PRUEBA 2: 3.15 % PRUEBA 3: 2.71 % OPACIDAD: 2.72 % FECHA Y HORA DE LA PRUEBA 8/9/2022 14:11:45	DISPOSITIVO DE MEDICION 8181 RPM RALENTI 705 RPM RPM GOBERNADA 4367 RPM TEMPERATURA DE OPACIDAD 0 ° NORMA OPACIDAD LIMITE: 15.00 % MOTIVO:	
RESULTADO: APROBADA		

OPERARIO RESPONSABLE: _____

LEONIDAS QUIROZ

Nota. En la imagen se observa el reporte al final de los 4 ensayos.

Cada prueba debe realizarse en periodos de 15 minutos, con el fin de que la temperatura del motor se estabilice, evitando sobrecalentamientos.

Prueba continua. Para este ensayo, se tomará los valores en diferentes de régimen de giro del motor los cuales son, ralentí, 1000, 2000, 3000 y 4000 RPM.

Con el vehículo de prueba y el analizador en óptimas condiciones, se debe proceder de la siguiente manera:

- Seleccionar en la interfaz la opción de prueba continua y registrar los datos del vehículo.

Figura 41.

Interfaz de prueba continua en MEC del software de control del analizador de gases



Nota. En la imagen se observa las mediciones de las emisiones del MEC en la prueba continua – ralentí.

- En esta prueba no se debe dejar colocada la sonda ya que los gases emitidos por el diésel degradan rápidamente los filtros.

Figura 42.

Control del ingreso de la sonda de medición de gases de escape



Nota. En la imagen se observa cómo se debe sostener la sonda de medición en la salida del escape para retirarla rápidamente.

- Una vez ingresado la sonda al escape, se tiene un periodo de 5 segundos para generar el informe.

Figura 43.

Interfaz de la prueba continua en MEC – 1000 rpm



Nota. En la imagen se observa la interfaz del equipo al realizar la medición en el vehículo diésel de prueba continua a 1000 RPM.

- Luego de generar el informe retirar la sonda, limpiar el hollín y continuar con los ensayos a diferente régimen del motor.

Figura 44.

Informe generado del ensayo de prueba continua en MEC

 BrainBee[®] AUTOMOTIVE		ANÁLISIS GASES ESCAPE	
ANALIZADOR	AGS-688	CUENTARREVOLUCIONES	
Número de serie :	160513000054	Número de serie :	
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPEL			
BELISARIO QUEVEDO		0987507064	
LATACUNGA		laquiroz@espe.edu.ec	
Datos del vehículo:			
Marca :	CHEVROLET	Modelo :	DMAX
Matricula :	PCR-3801	No. Chasis :	8LBETF3T7G0383922
Combustible :	GASOLINA	Km recorridos :	166874
Valores relevados:			
Temp. motor	[°C]	:	81
RPM	[1/min]	:	1510
COcorr	[%Vol]	:	0.68
Lambda	[-]	:	—
CO	[%Vol]	:	0.09
CO ₂	[%Vol]	:	1.9
HC	[ppmVol]	:	0
O ₂	[%Vol]	:	19.4
NO	[ppmVol]	:	62
Fecha y hora prueba	:	09/08/2022	12:44
Sello			
Firma			

Nota. En la imagen se observa el reporte al final de la prueba continua en los MEC.

Parámetros De Comparación Con La Normativa

Parámetros de normalización de emisiones para MEP

Tabla 11.

Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos con motor a gasolina (Prueba estática en marcha mínima o ralentí).

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

a volumen

b Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm)

Nota. En la tabla se muestra los límites máximos de emisiones permitidos para vehículos de gasolina en marcha mínima o ralentí. Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

Tabla 12.

Límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (ciclos americanos FTP – 75, g/mi)

Categoría	50000 millas/5 años				100000 millas/10 años ^a			
	CO	THC	NMHC	NO _x	CO	THC	NMHC	NO _x
	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi
Vehículos de pasajeros	3,4	0,41	0,25	0,4	4,2	–	0,31	0,6
LLDT, LV < 3750 lbs	3,4	–	0,25	0,4	4,2	0,80	0,31	0,6
LLDT, LV > 3750 lbs	4,4	–	0,32	0,7	5,5	0,80	0,40	0,97
HLDT, ALV < 5750 lbs	4,4	0,32	–	0,7	6,4	0,80	0,46	0,98
HLDT, ALV > 5750 lbs	5,0	0,39	–	1,1	7,3	0,80	0,56	1,53

^a Vida útil 120,000 millas/11 años para todos los estándares HLDT, THC y LDT

Abreviaturas:

PBV Peso bruto vehicular

LVW Peso del vehículo cargado (tara + 300 lbs)

ALVW LVW ajustado (promedio numérico de la tara y el PBV)

LDT Camión ligero

LLDT Camión liviano ligero (debajo de 6000 lbs PBV)

HLDT Camión ligero pesado (sobre 6000 lbs PBV)

Nota. En la tabla se muestra los límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (ciclos americanos FTP – 75, g/mi). Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

Tabla 13.

Límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (Directiva de la UE 98/69/CE)

Categoría	Clase	Peso de referencia (PR) kg	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>HC</i>	<i>NO_x</i>	Ciclo de prueba
			<i>g/km</i>	<i>g/km</i>	+ <i>NO_x</i> <i>g/km</i>		
<i>M^a</i>	–	<i>Todas</i>	2,3	0,2	–	0,15	<i>ECE + EUDC</i>
<i>N1^b</i>	<i>I</i>	$PR \leq 1305$	2,3	0,2	–	0,15	(también
	<i>II</i>	$1350 < PR \leq 1760$	4,17	0,25	–	0,18	conocido
	<i>III</i>	$1760 < PR$	5,22	0,29	–	0,21	como MVEG-A)

^a Salvo los vehículos cuyo peso máximo sobrepase 2500 kg

^b Y los vehículos de la categoría M que sobrepasen 2500 kg

Nota. En la tabla se muestra los límites máximos de emisiones para motores a gasolina en pruebas dinámicas (Directiva de la UE 98/69/CE). Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

Parámetros de normalización de emisiones para MEC

Tabla 14.

Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica, ciclos americanos).*

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso del vehículo cargado kg	CO g/km	HC g/km	NO_x g/km	Partículas g/km	Ciclos de Prueba
Vehículos Livianos	Todos	Todos	2,10	0,25	0,62	0,12	
Vehículos Medianos	≤ 3860	≤ 1700 > 1700 ≤ 3860	6,2	0,5	0,75	0,16	FTP-75
Vehículos Pesados**	> 3860	Todos	15,5	1,3	5,0	0,10***	Transiente Pesado

* prueba realizada a nivel del mar

** en g/bHP (gramos / brake Horse Power - hora)

*** para buses urbanos el valor es 0,07 g/bHP

Nota. En la tabla se muestra los límites máximos de emisiones para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica*, ciclos americanos). Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002).

Tabla 15.

Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica, ciclos europeos).*

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso del vehículo cargado kg	CO g/km	HC g/km	NO_x g/km	Partículas g/km	Ciclos de Prueba
<i>M1⁽¹⁾</i>		<i>Todos</i>	2,72	0,97 ⁽⁴⁾		0,14	
		≤ 1250	2,72	0,97 ⁽⁴⁾		0,14	<i>ECE</i>
<i>M⁽²⁾, N1</i>	≤ 3500	> 1250	5,17	1,4 ⁽⁴⁾	0,19	0,19	– 15
		≤ 1700					+ <i>EUDC</i>
		> 1700	6,9	1,4 ⁽⁴⁾	0,25		
<i>N2, N3, M2, M3⁽³⁾</i>	> 3500	<i>Todos</i>	4,0	1,1	7,0	0,15	<i>ECE</i> – 49

* Prueba realizada a nivel del mar

⁽¹⁾ Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor y con un peso bruto del vehículo menor o igual a 2,5 toneladas.

⁽²⁾ vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor o cuyo peso bruto del vehículo exceda de 2,5 toneladas

⁽³⁾ Unidades g/kWh

⁽⁴⁾ HC + NO_x

Nota. En la tabla se muestra los límites máximos de emisiones permitidos para vehículos a diésel a partir del año 2000 (prueba dinámica, ciclos europeos). Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002).

También se encuentra los límites de humos permitidos según la tabla a continuación mostrada.

Tabla 16.

Límites de opacidad para vehículos diésel para prueba de aceleración libre

Año modelo	% Opacidad
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

Nota: En la tabla se muestra los límites de opacidad para vehículos diésel para prueba de aceleración libre (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002).

Capítulo IV

Análisis de Resultados

MEP – Análisis De Gases Continuo

Los ensayos realizados mediante la prueba de gases continuo reflejan la concentración en volumen de CO_{corr}, CO, Lambda, CO₂, HC, O₂, NO_x de los gases de escape. Estas concentraciones se obtienen bajo dos condiciones de operación del motor del vehículo de prueba, la primera en ralentí y la segunda a régimen elevado constante (2500 RPM).

Datos - Análisis De Gases Continuos Sin Hidrógeno

Se realizó cinco pruebas de análisis de gases continuo en un MEP sin el generador de hidrógeno a diferente régimen de revolución, obteniendo los datos que se presentan a continuación.

Tabla 17.

Análisis de gases continuo - MEP - sin hidrógeno

N ^o	Temp.	RPM	CO _{corr}	λ	CO	CO ₂	HC	O ₂	NO
	Motor								
	°C	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
1	91	650	0,04	1,008	0,04	15,2	71	0,27	0
2	90	1520	0,2	1,019	0,19	14,2	120	0,61	17
3	91	2060	0,65	0,984	0,65	15	106	0,15	0
4	91	3020	0,48	0,992	0,48	14,9	90	0,21	57
5	94	4010	0,38	0,993	0,38	15	45	0,12	32

Nota. La tabla detalla los datos obtenidos de las pruebas a diferente régimen de revolución para el análisis de gases continuo en un MEP sin generador de hidrógeno.

Datos - Análisis De Gases Continuos Con Hidrógeno

Una vez realizado cinco pruebas de análisis de gases continuo en un MEP con un generador de hidrógeno a diferente régimen de revolución, se obtuvo los datos que se presentan a continuación.

Tabla 18.

Análisis De Gases - Mep - Con Hidrógeno

Nº	Temp. Motor °C	RPM 1/min	COcorr %Vol	λ	CO %Vol	CO2 %Vol	HC ppmVol	O2 %Vol	NO ppmVol
1	91	660	0,29	1,025	0,29	14,6	162	0,85	26
2	91	990	0,23	1,002	0,23	15,1	110	0,29	32
3	92	2530	0,34	1,073	0,3	12,8	65	1,6	69
4	94	3030	0,3	1,014	0,3	15	61	0,54	21
5	95	4020	0,53	1,018	0,53	14,8	39	0,75	21

Nota. La tabla detalla los datos obtenidos de las pruebas a diferente régimen de revolución para el análisis de gases continuo en un MEP con generador de hidrógeno.

Comparación Análisis De Gases Continuo – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno

Variación Prueba 1 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Se realizo dos pruebas continuas a un régimen de revolución en ralentí, una con el generador de hidrógeno y otra sin el mismo, se obtuvieron los siguientes datos.

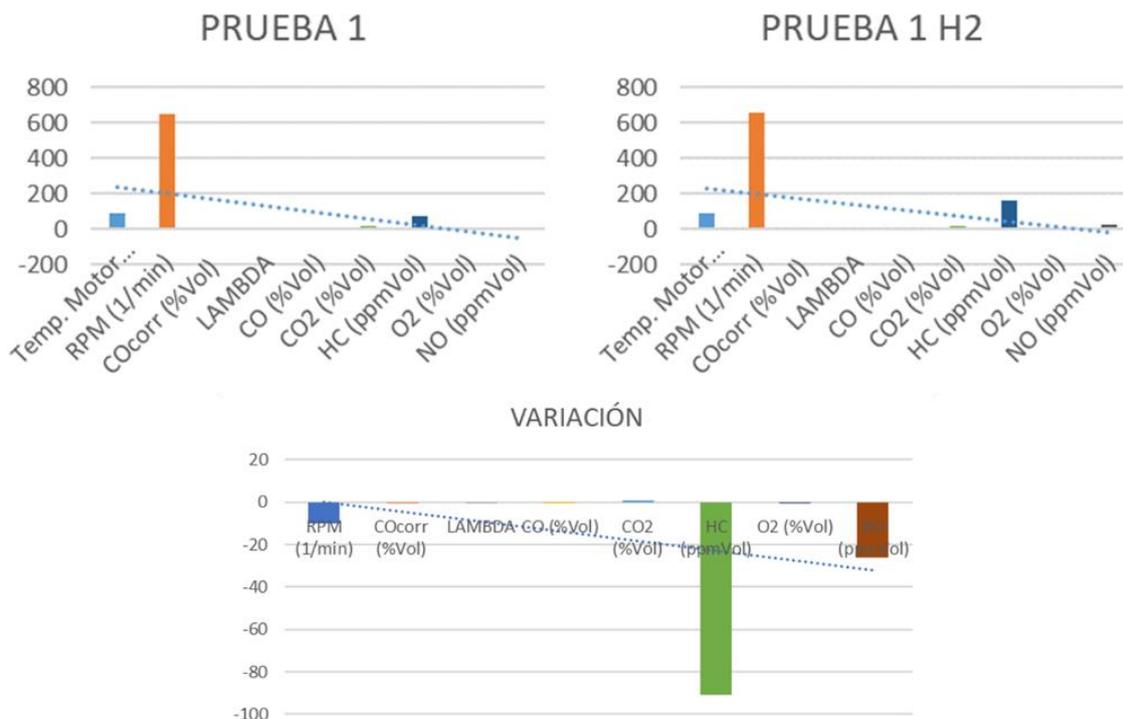
Tabla 19.*Prueba 1 – MEP – con H₂ vs sin H₂*

Prueba	RPM	CO_{corr}	λ	CO	CO₂	HC	O₂	NO
	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
Sin H ₂	650	0,04	1,008	0,04	15,2	71	0,27	0
Con H ₂	660	0,29	1,025	0,29	14,6	162	0,85	26
Diferencia	-10	-0,25	-0,017	-0,25	0,6	-91	-0,58	-26

Nota. La tabla detalla la variación en la prueba 1 de los datos obtenidos con y sin hidrógeno.

Figura 45.

Comparación valores obtenidos prueba 1



Nota. La gráfica muestra la variación existente en la prueba 1 realizada en ralentí en un MEP.

La variación de óxidos de nitrógeno (NO) en un régimen de revolución en ralentí al momento que se activa el generador de hidrógeno, se puede presenciar un incremento de 26 ppmVol, de igual manera el incremento de Lambda de 1,008 a 1,0025 que se ve reflejado en los hidrocarburos (HC) en un incremento de 91 ppmVol, es notable que al disminuir el dióxido de carbono (CO₂) de 15,2 a 14,6 %Vol. se incrementa el oxígeno (O₂) de 0,27 a 0,85 %Vol.

Variación Prueba 2 – MEP – Con H₂ Vs Sin H₂. En la tabla 20 se indican los valores referentes a un análisis de gases continuo en un régimen de revolución de 1500 RPM.

Tabla 20.*Prueba 2 – MEP – con H2 vs sin H2*

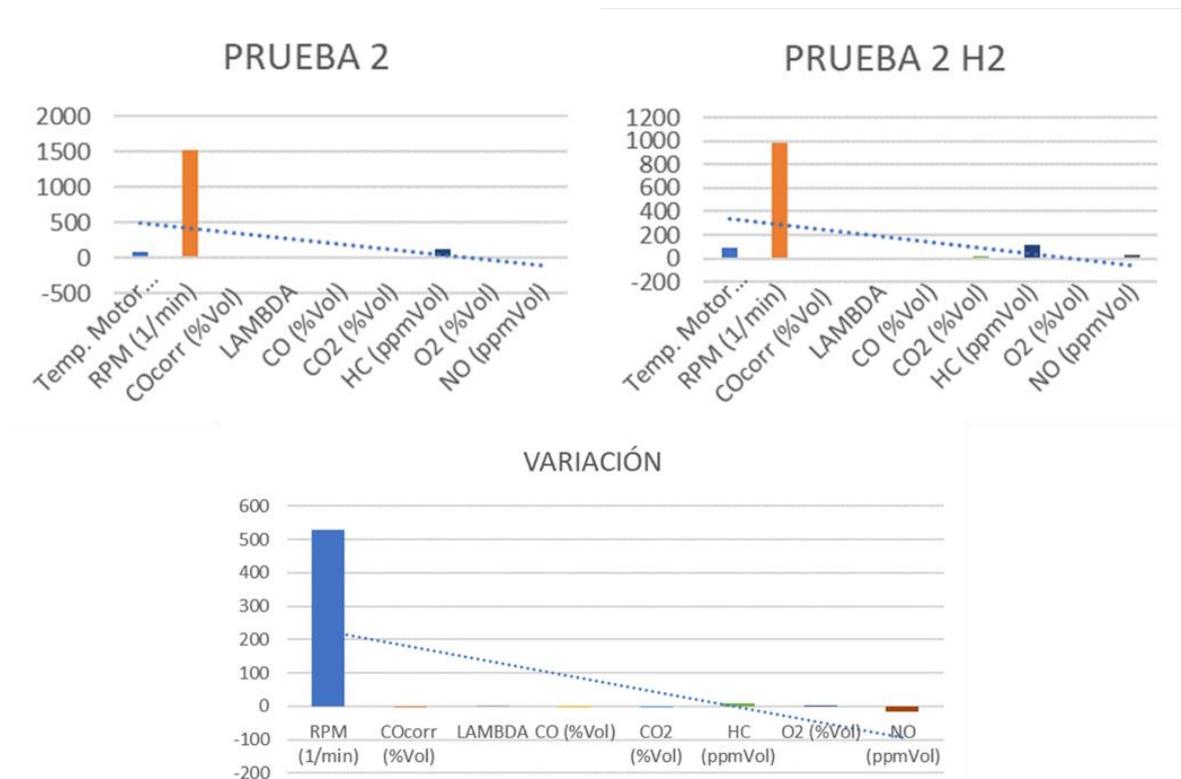
Prueba	RPM	CO_{corr}	λ	CO	CO₂	HC	O₂	NO
	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
Sin H2	1520	0,2	1,019	0,19	14,2	120	0,61	17
Con H2	1530	0,23	1,002	0,23	15,1	110	0,29	32
Diferencia	530	-0,03	0,017	-0,04	-0,9	10	0,32	-15

Nota. La tabla, muestra datos sobre la prueba 2 realizado en un MEP.

Al aumentar el régimen de revoluciones a 1500 aproximadamente, se observa un decaimiento de lambda de 0,04 lo que va a influir directamente en los hidrocarburos (HC) pasando de 120 a 110 ppmVol, de igual manera el incremento de monóxido de carbono en 0,04 %Vol. y el dióxido de carbono (CO₂) en 0,9 %Vol. provocando la caída del oxígeno en 0,32 %Vol.

Figura 46.

Comparación valores obtenidos prueba 2



Nota. La gráfica contempla los puntos de varianza que existe en la prueba de gases continua.

Al aumentar el régimen de revoluciones a 1500 aproximadamente, se observa un decaimiento de lambda de 0,04 lo que va a influir directamente en los hidrocarburos (HC) pasando de 120 a 110 ppmVol, de igual manera el incremento de monóxido de carbono en 0,04 %Vol. y el dióxido de carbono (CO₂) en 0,9 %Vol. provocando la caída del oxígeno en 0,32 %Vol.

Variación Prueba 3 – MEP – Con H₂ Vs Sin H₂. En a prueba 3 se realizó un test de análisis de gases continuo donde se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 21.

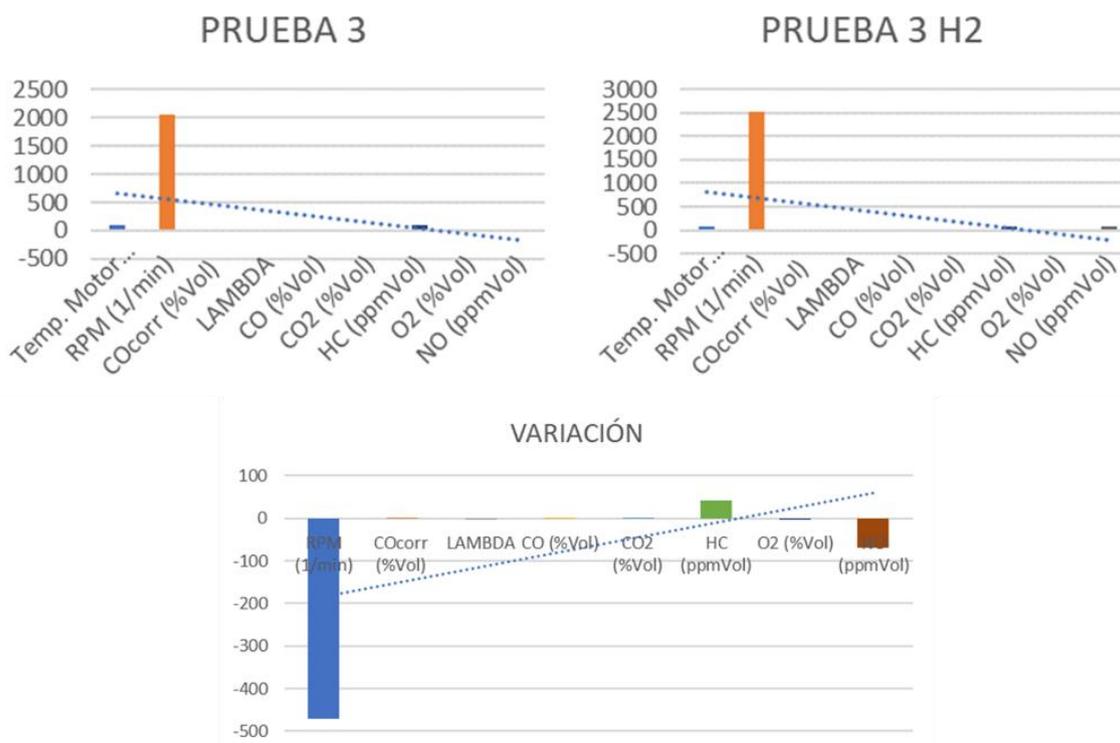
Prueba 3 – MEP – con H2 vs sin H2

Prueba	RPM	CO _{corr}	λ	CO	CO ₂	HC	O ₂	NO
	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
Sin H2	2060	0,65	0,984	0,65	15	106	0,15	0
Con H2	2030	0,34	1,073	0,3	12,8	65	1,6	69
Diferencia	-470	0,31	-0,089	0,35	2,2	41	-1,45	-69

Nota. En la tabla se evidencia la variación existente en la prueba 3 en un MEP con y sin hidrógeno.

Figura 47.

Comparación valores obtenidos prueba 3



Nota. La gráfica señala los valores de RPM, COcorr, Lambda, CO, CO₂, HC, O₂ y NO obtenidos en la variación de datos en la prueba 3.

En un régimen de revolución de 2000 RPM lambda baja de 1 cuando el MEP no se encuentra con hidrógeno y se mantiene estable cuando se tiene el generador instalado, así se observa una variación de 0,089 que a su vez se ve reflejado en la emisión de hidrocarburos (HC) pasando de 106 a 65 ppmVol cuando se encuentra con hidrógeno, la presencia de oxígeno aumenta drásticamente de 0,15 a 1,6 %Vol. lo que significa que se tiene un decaimiento de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en los valores de 0,65 a 0,3 %Vol. y 15 a 12,8 %Vol. respectivamente.

Variación prueba 4 – MEP – con h2 vs sin h2. Para la prueba 4 se obtuvieron valores en un régimen de revolución de 3000 RPM que se presentan en la tabla 22.

Tabla 22.

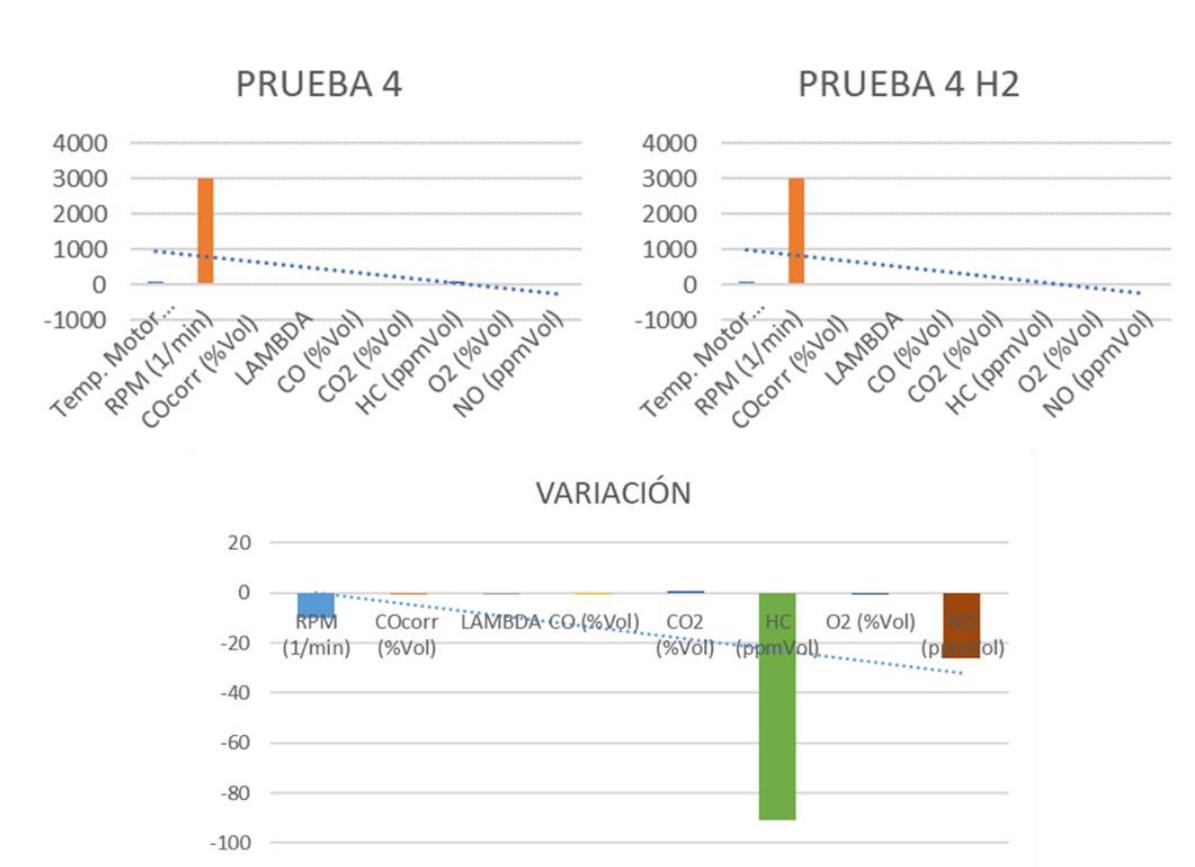
Prueba 4 – MEP – con H2 VS sin H2

Prueba	RPM	CO_{corr}	λ	CO	CO₂	HC	O₂	NO
	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
Sin H2	3020	0,48	0,992	0,48	14,9	90	0,21	57
Con H2	3030	0,3	1,014	0,3	15	61	0,54	21
Diferencia	-10	0,18	-0,022	0,18	-0,1	29	-0,33	36

Nota. La tabla presenta datos de RPM, COcorr, LAMBDA, CO, CO₂, HC, O₂, NO, obtenidos en la prueba 4.

Figura 48.

Comparación valores obtenidos prueba 4



Nota. En la gráfica se puede notar que el régimen de revoluciones está dado alrededor de 3000 RPM.

Cuando el motor se encuentra en un régimen de revolución de 3000 RPM en prueba continua, da valores de 57 ppmVol de óxidos de nitrógeno (NO) cuando no se tiene la presencia de hidrógeno en el motor, al comenzar a suministrar el mismo, se encuentra un decaimiento de 36 ppmVol llevándolo a 21 ppmVol, lo mismo sucede con el incremento del oxígeno al estar en presencia con el hidrógeno, aumenta 0,33 %Vol. Ilegando a 0,54 %Vol. dando a conocer que el valor de monóxido de carbono (CO) va a descender a 0,3 %Vol.

Variación Prueba 5 – Mep – Con H2 Vs Sin H2. En cada test se realizaron dos pruebas, una con la instalación de un generador de hidrógeno y en la otra no, a continuación, se muestran los valores para la tabla 23.

Tabla 23.

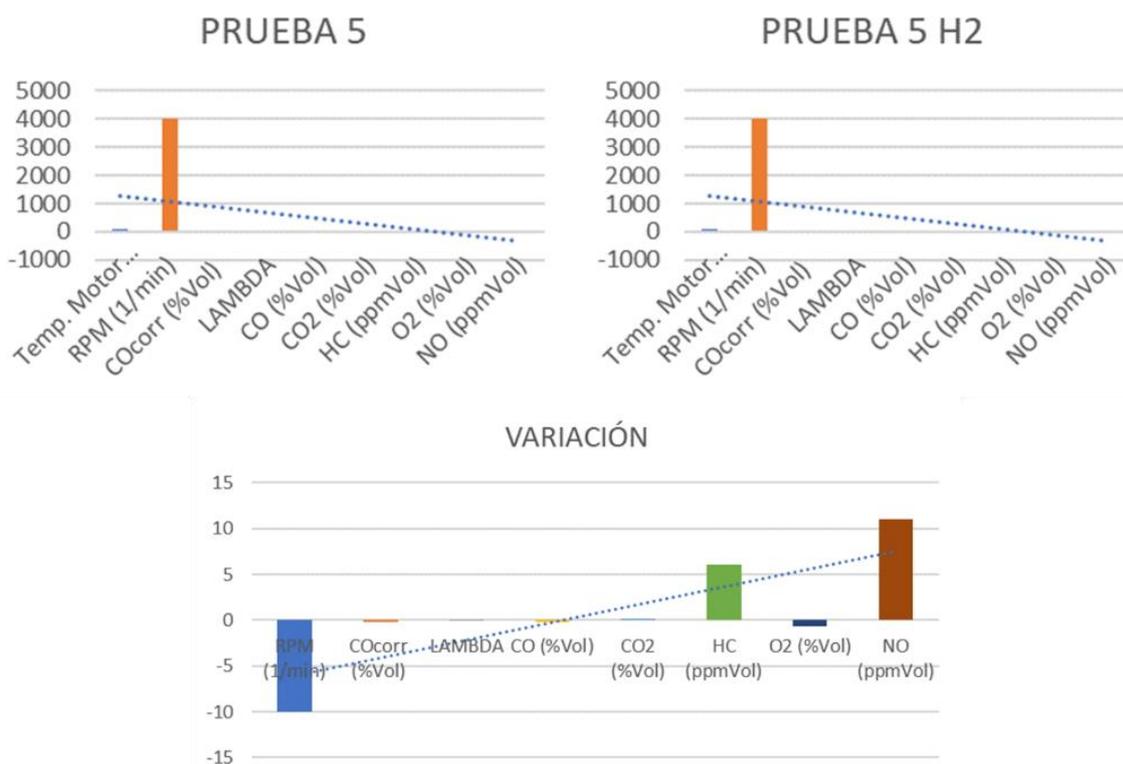
Prueba 5 – MEP – con H2 VS sin H2

Prueba	RPM	CO _{corr}	λ	CO	CO ₂	HC	O ₂	NO
	1/min	%Vol		%Vol	%Vol	ppmVol	%Vol	ppmVol
Sin H2	4010	0,38	0,993	0,38	15	45	0,12	32
Con H2	4020	0,53	1,018	0,53	14,8	39	0,75	21
Diferencia	-10	-0,15	-0,025	-0,15	0,2	6	-0,63	11

Nota. La tabla presenta datos dados en la prueba 5 realizados en un MEP.

Figura 49.

Comparación valores obtenidos prueba 5



Nota. La gráfica expone la variación que existe entre el análisis de gases realizado en un MEP con y sin hidrógeno.

En un régimen de revolución de 4000 RPM en la prueba de análisis de gases muestra valores de 0,993 en lambda cuando el motor de no está siendo suministrado de hidrógeno, en tanto el valor aumenta en presencia del H₂ a 1,018 lo que muestra que tiene una mezcla pobre al momento realizar la mezcla aire – combustible, es poco notable la disminución del dióxido de carbono (CO₂) en 0,2 %Vol. llegando a 14,8 %Vol., lo que muestra que el porcentaje de oxígeno va a elevarse de 0,12 a 0,75 %Vol. y el monóxido de carbono (CO) tiende a elevarse a 0,53 %Vol.

MEP - Variación De Datos CO₂ – O₂

Se detalla cinco pruebas realizadas a diferentes regímenes de revolución en donde se detalla valores de CO₂ y O₂.

Tabla 24.

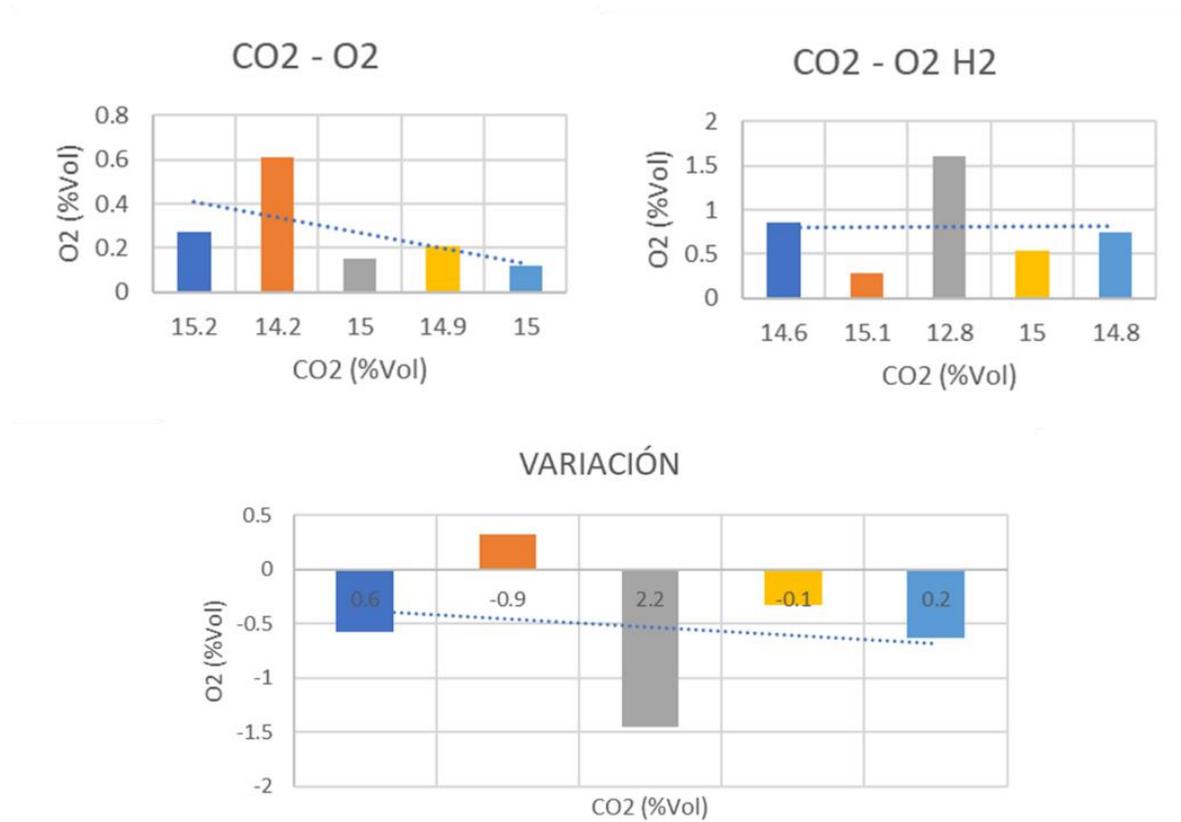
Variación de datos CO₂ – O₂

Análisis de gases			Análisis de gases (H₂)			Variación		
Nº	CO₂ (%Vol)	O₂ (%Vol)	Nº	CO₂ (%Vol)	O₂ (%Vol)	Nº	CO₂ (%Vol)	O₂ (%Vol)
1	15,2	0,27	1	14,6	0,85	1	0,6	-0,58
2	14,2	0,61	2	15,1	0,29	2	-0,9	0,32
3	15	0,15	3	12,8	1,6	3	2,2	-1,45
4	14,9	0,21	4	15	0,54	4	-0,1	-0,33
5	15	0,12	5	14,8	0,75	5	0,2	-0,63

Nota. La tabla indica valores de variación en los gases CO₂ y O₂.

Figura 50.

Resultados y variación CO₂ – O₂



Nota. La gráfica muestra los resultados obtenidos a partir de la comparación de los datos que se tiene de los gases con y sin hidrógeno.

Al estar el hidrógeno en el motor muestra que el incremento del oxígeno se ve bastante notable en comparación con los datos obtenidos en el motor que no tienen hidrógeno, al realizar la comparación del oxígeno (O₂) presente en el instante que el dióxido de carbono (CO₂) es 15 %Vol., se puede evidenciar que existe un incremento del mismo por la presencia del hidrógeno en el MEP, así, pues se ve un incremento de 0,39 %Vol., al relacionar estos valores se verifica que mientras exista mayor CO₂ baja la del O₂.

MEP - Variación De Datos Lambda – HC

Los datos obtenidos de LAMBDA y HC en el análisis de gases continuo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 25.

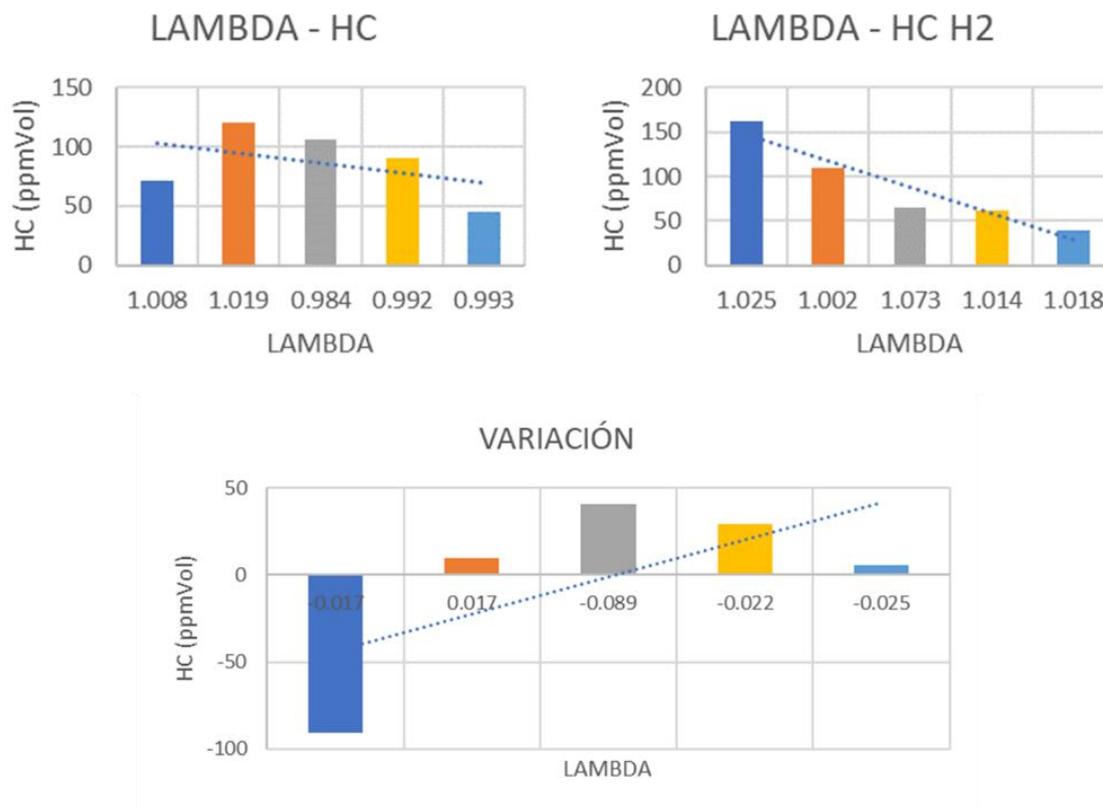
Variación de datos Lambda – HC

Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)
1	1,008	71	1	1,025	162	1	-0,017	-91
2	1,019	120	2	1,002	110	2	0,017	10
3	0,984	106	3	1,073	65	3	-0,089	41
4	0,992	90	4	1,014	61	4	-0,022	29
5	0,993	45	5	1,018	39	5	-0,025	6

Nota. La tabla muestra los valores de LAMBDA y HC pertenecientes al análisis de gases continuo.

Figura 51.

Resultados y variación Lambda - HC



Nota. La gráfica revela la variación existente entre los gases emitidos por un MEP sin hidrógeno y aplicado hidrógeno al mismo.

La relación que existe entre lambda y los hidrocarburos (HC) es inversamente proporcional, ya que si lambda aumenta más de uno, muestra que se tiene la presencia de una mezcla pobre, si ocurre al contrario, cuando lambda es menor que uno, indica que la mezcla es rica, lo que significa, mayor combustible en la mezcla aire – combustible, es por eso que si lambda aumenta se ve menor hidrocarburos en los gases de escape, al realizar la comparativa de entre lambda 1,019 cuando no se encuentra la hidrógeno y 1,018 con el mismo se puede ver una gran diferencia de 81 ppmVol de hidrocarburos.

MEP - Variación De Datos Lambda - CO2 – HC

Los datos de LAMBDA, CO2 y HC fueron tabulados por dos pruebas en donde se encuentra un análisis de gases con hidrógeno y otro sin el mismo, mostrando una variación entre ellos.

Tabla 26.

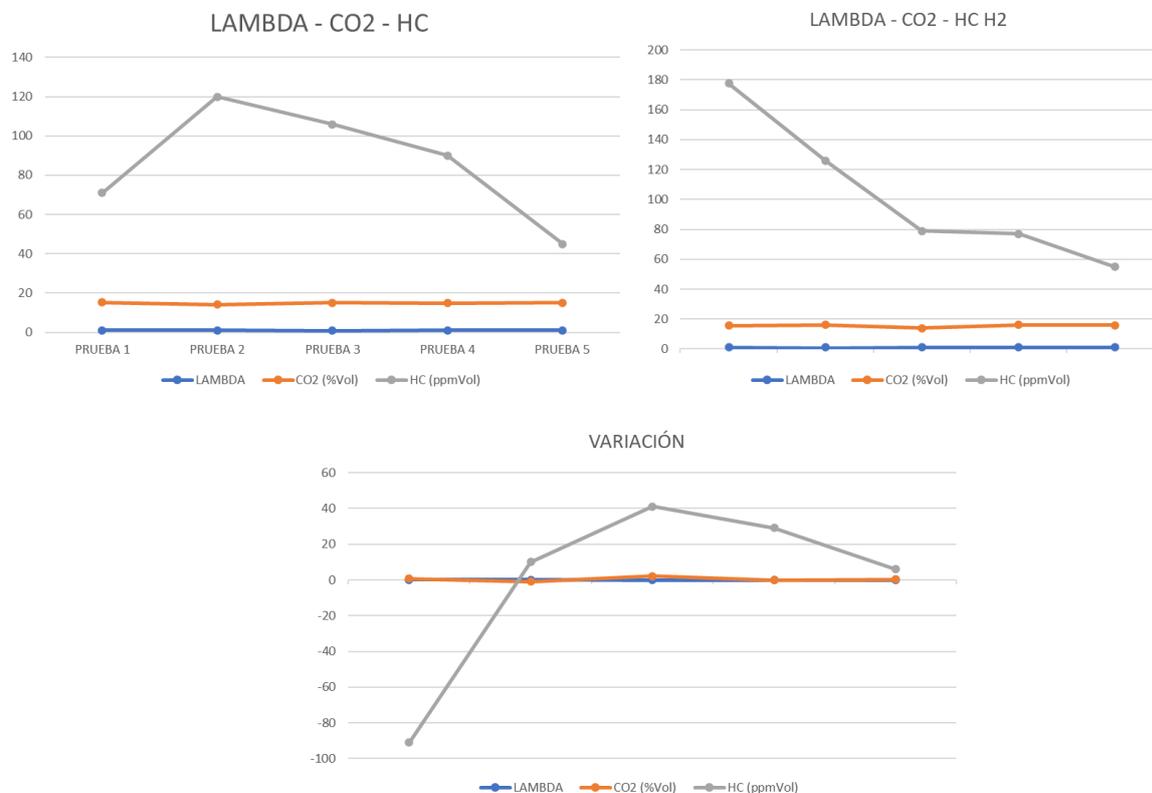
Variación de datos LAMBDA - CO2 – HC

Nº	Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
	λ	CO2 (%Vol)	HC (ppmVol)	λ	CO2 (%Vol)	HC (ppmVol)	λ	CO2 (%Vol)	HC (ppmVol)
1	1,008	15,2	71	1,025	14,6	162	-0,017	0,6	-91
2	1,019	14,2	120	1,002	15,1	110	0,017	-0,9	10
3	0,984	15	106	1,073	12,8	65	-0,089	2,2	41
4	0,992	14,9	90	1,014	15	61	-0,022	-0,1	29
5	0,993	15	45	1,018	14,8	39	-0,025	0,2	6

Nota. La tabla muestra valores adquiridos en 5 pruebas realizadas en un MEP.

Figura 52.

Resultados y variación lambda - CO2 - HC



Nota. La gráfica señala los valores que varían referente a los gases de LAMBDA, CO2 y HC.

Con respecto al valor 15 %Vol. de dióxido de carbono (CO2) se hace un análisis a la variación que tiene lambda al instante que se encuentra con hidrógeno, se observa que lambda aumenta, lo que quiere decir que se produce una mezcla aire – combustible pobre, que a su vez es compensada por hidrógeno en la combustión, es por eso que se observa una disminución de los hidrocarburos (HC) en los gases de escape con 61 ppmVol con H2, se nota la variación de 106 ppmVol de hidrocarburos cuando no está en presente el H2.

MEP - Variación De Datos CO – O2

La variación existente entre CO y O2 obtenidos por el test de análisis de gases continuo se muestra en la tabla 27.

Tabla 27.

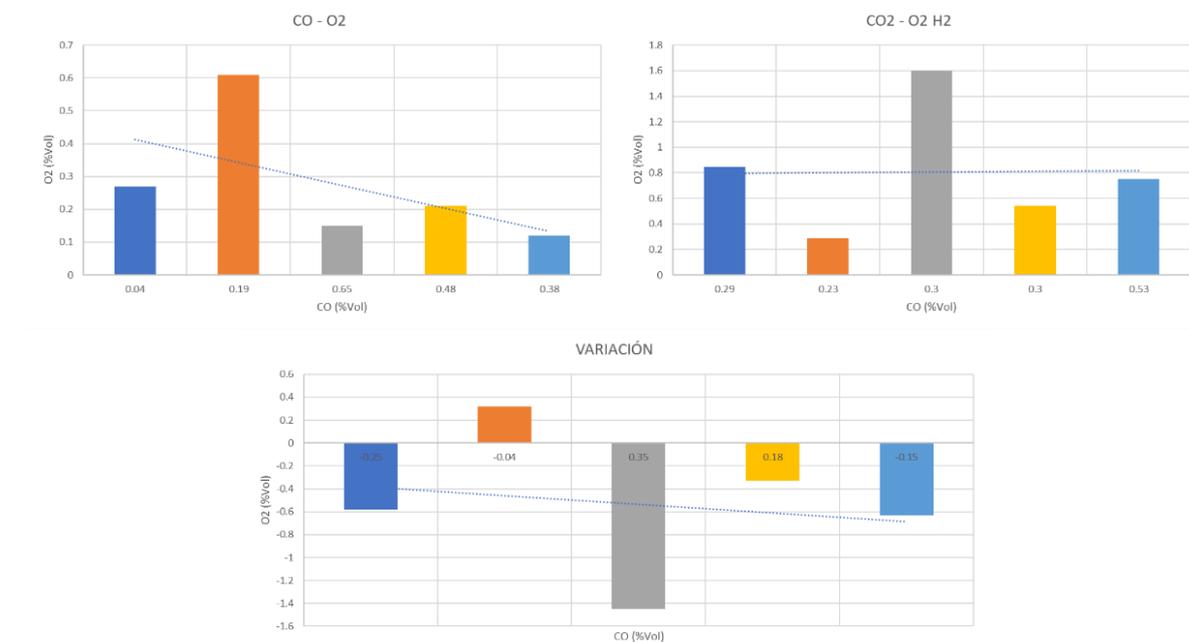
Variación de datos CO – O2

Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
Nº	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	Nº	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	Nº	CO (%Vol)	O2 (%Vol)
1	0,04	0,27	1	0,29	0,85	1	-0,25	-0,58
2	0,19	0,61	2	0,23	0,29	2	-0,04	0,32
3	0,65	0,15	3	0,3	1,6	3	0,35	-1,45
4	0,48	0,21	4	0,3	0,54	4	0,18	-0,33
5	0,38	0,12	5	0,53	0,75	5	-0,15	-0,63

Nota. La tabla detalla datos obtenidos en el análisis de gases en un MEP.

Figura 53.

Resultados y variación CO - O2



Nota. La gráfica manifiesta el análisis de los datos obtenidos mediante el test de análisis de gases oficial en un MEP.

En las pruebas realizadas se puede observar que el valor de 0,65 %Vol. de monóxido de carbono (CO) es el más alto obtenido de todo el test de análisis de gases con un valor de 0,15 de oxígeno (O2) cuando no está el hidrógeno en el MEP, para el valor más bajo de monóxido de carbono es 0,04 %Vol. con un valor de 0,27 %Vol. de oxígeno, los valores de oxígeno más elevados están con hidrógeno con un valor de 1,6 %Vol. y un monóxido de carbono de 0,3 %Vol.

MEP - Variación De Datos Lambda - CO2

Se realizó 5 pruebas donde se obtuvieron datos de LAMBDA y CO2 a partir de la implementación de hidrógeno en un MEP.

Tabla 28.

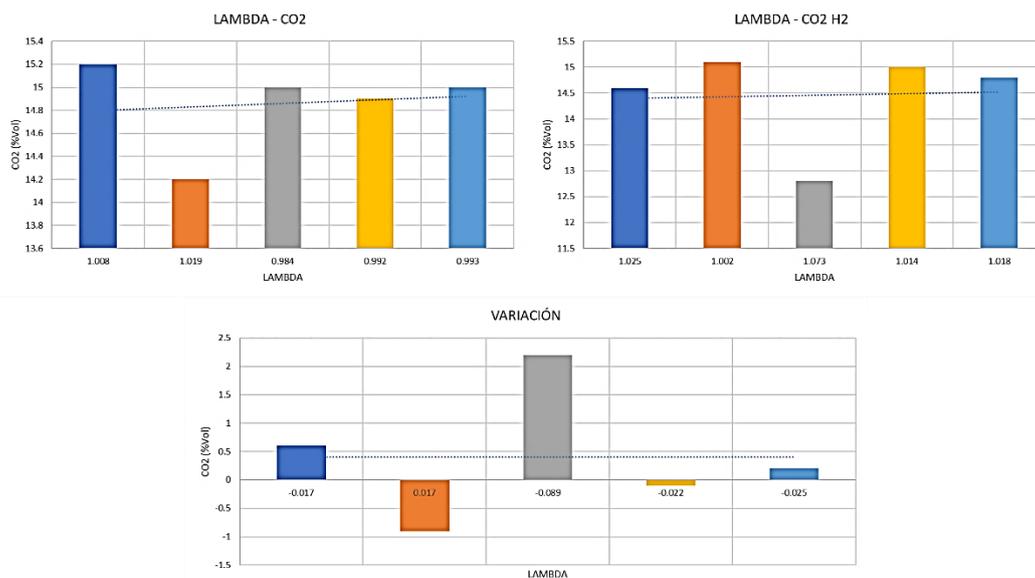
Variación de datos Lambda - CO2

Análisis de gases			Análisis de gases(H_2)			Variación		
Nº	λ	CO_2 (%Vol)	Nº	λ	CO_2 (%Vol)	Nº	λ	CO_2 (%Vol)
1	1,008	15,2	1	1,025	14,6	1	-0,017	0,6
2	1,019	14,2	2	1,002	15,1	2	0,017	-0,9
3	0,984	15	3	1,073	12,8	3	-0,089	2,2
4	0,992	14,9	4	1,014	15	4	-0,022	-0,1
5	0,993	15	5	1,018	14,8	5	-0,025	0,2

Nota. La tabla muestra la variación de LAMBDA y CO2 provenientes de la aplicación de hidrógeno en un MEP.

Figura 54.

Resultados y variación Lambda - CO2



Nota. La gráfica expone los datos que se obtuvieron en los gases antes y después de ser implementado el hidrógeno en un MEP.

Para un valor de lambda de 1,018 con hidrógeno, se tiene 14,8 %Vol. de dióxido de carbono (CO₂), en comparación con el valor de 1,019 de lambda sin hidrógeno se tiene 14,2 %Vol. de dióxido de carbono y en la gráfica de variación se observa que la diferencia es mínima referente al cambio que tenga con hidrógeno cuando se compara el dióxido de carbono con lambda.

MEP - Variación De Datos RPM – NO

El análisis de gases continuo fue realizado a diferentes regímenes de revolución y estos son comparados con la emisión de óxidos de nitrógeno.

Tabla 29.

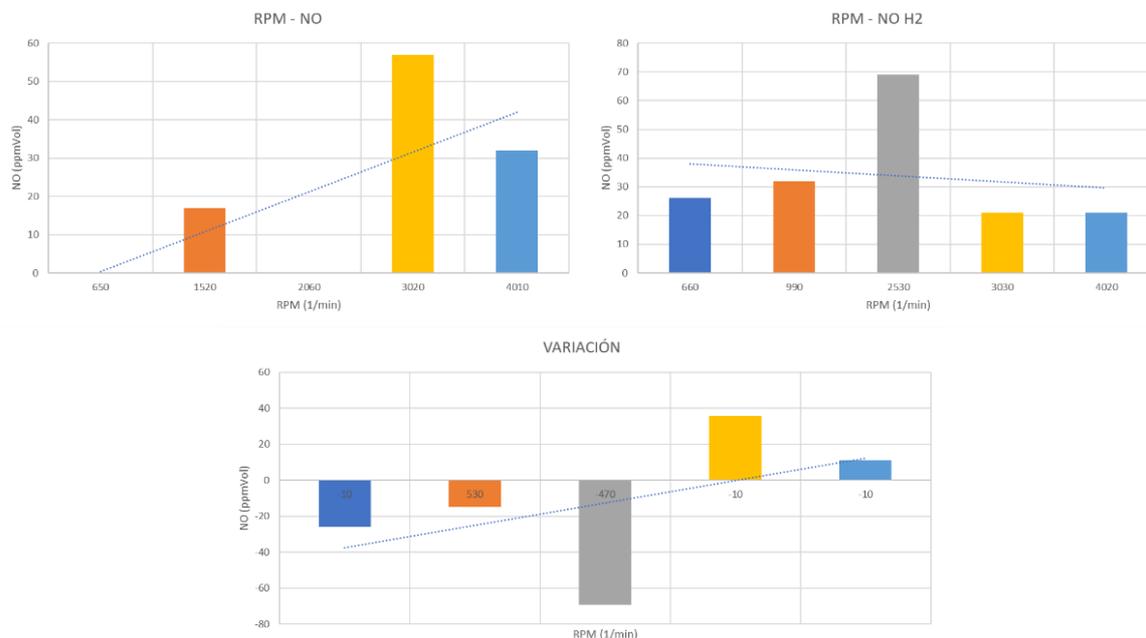
Variación de datos RPM – NO

Análisis de gases			Análisis de gases (H ₂)			Variación		
Nº	RPM (1/min)	NO (ppmVol)	Nº	RPM (1/min)	NO (ppmVol)	Nº	RPM (1/min)	NO (ppmVol)
1	650	0	1	660	26	1	-10	-26
2	1520	17	2	1530	32	2	530	-15
3	2060	0	3	2030	69	3	-470	-69
4	3020	57	4	3030	21	4	-10	36
5	4010	32	5	4020	21	5	-10	11

Nota. La tabla muestra los valores de cinco pruebas obtenidos por análisis de gases continuo en un MEP.

Figura 55.

Resultados y variación RPM - NO



Nota. La gráfica presenta la cantidad de NO que se obtiene a partir del régimen de revoluciones.

En el momento que se tiene el MEP en ralentí, se puede evidenciar que el los óxidos de nitrógeno (NO) se ven en gran proporción en aumento cuando se ve comprometido en este, el punto de comparación es claro, ya que sin H2 el número de ppmVol es de 0, mientras que, con H2 se observa 26 ppmVol, observando se analiza que mientras más aumenta el régimen de revoluciones del motor, el número de óxidos de nitrógeno disminuye, ya sea en presencia o no del hidrógeno, para un régimen medio de alrededor de 2000 RPM se puede notar una variación elevada, puesto que sin el mismo vuelve a tener 0 ppmVol de óxido de nitrógeno y 69 ppmVol con presencia de hidrógeno.

MEP – Variación De Datos CO_{corr} – CO – CO_2 – LAMBDA

El factor de corrección que realiza el análisis de gases continuo es el de monóxido de carbono donde se lo tabula con el monóxido de carbono, dióxido de carbono y lambda.

Tabla 30.

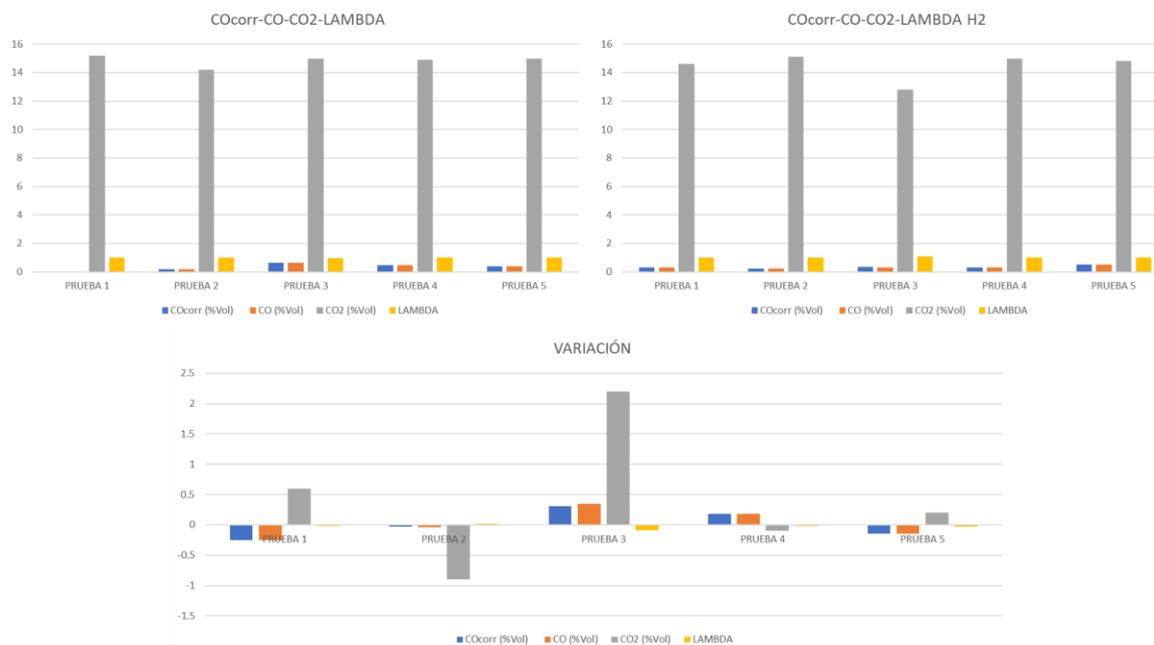
Variación de datos COcorr - CO - CO₂ - Lambda

Nº	Análisis de gases				Análisis de gases (H ₂)				Variación			
	COcorr (%Vol)	CO (%Vol)	CO ₂ (%Vol)	λ	COcorr (%Vol)	CO (%Vol)	CO ₂ (%Vol)	λ	COcorr (%Vol)	CO (%Vol)	CO ₂ (%Vol)	λ
1	0,04	0,04	15,2	1,008	0,29	0,29	14,6	1,025	-0,25	-0,25	0,6	-0,017
2	0,2	0,19	14,2	1,019	0,23	0,23	15,1	1,002	-0,03	-0,04	-0,9	0,017
3	0,65	0,65	15	0,984	0,34	0,3	12,8	1,073	0,31	0,35	2,2	-0,089
4	0,48	0,48	14,9	0,992	0,3	0,3	15	1,014	0,18	0,18	-0,1	-0,022
5	0,38	0,38	15	0,993	0,53	0,53	14,8	1,018	-0,15	-0,15	0,2	-0,025

Nota. La tabla muestra los datos de COcorr, CO, CO₂, LAMBDA evaluados mediante análisis de gases continuo.

Figura 56.

Resultados y variación COcorr – CO – CO₂ – LAMBDA



Nota. La gráfica indica la variación que se tiene entre los datos obtenidos del MEP sin hidrógeno y lo compara con el mismo motor aplicado hidrógeno.

Los valores oscilantes de dióxido de carbono (CO₂) van alrededor de 15 %Vol., a partir de este dato se toma en referencia que los valores de CO_{corr} son 0,65 y 0,38 %Vol. cuando no se tiene hidrógeno en el MEP y un valor de 0,3 %Vol. cuando se encuentra hidrógeno, el valor de lambda está por encima de uno con H₂ lo que confirma que si se tiene una mejor combustión y la ECU envía una mezcla pobre, cosa que no ocurre cuando no se tiene hidrógeno, por eso que se encuentra valores inferiores a uno como es el caso de 0,984 sin H₂ con el mismo dióxido de carbono de 15 %Vol.

MEP – Análisis De Gases Oficial

El siguiente test se lo realizó en dos etapas con cinco pruebas en cada una de ellas, la primera se realizó sin hidrógeno y la segunda se aplicó el generador de hidrógeno, de esta manera se realizó un análisis de variación entre los parámetros como son: CO, CO₂, O₂, HC LAMBDA, con los datos obtenidos.

Datos – Análisis Oficial Sin Hidrógeno

Con respecto a los datos obtenidos por medio del analizar de gases se encuentra datos en la prueba al mínimo o ralenti y también prueba en aceleración.

Datos – Análisis Oficial Sin Hidrógeno – Prueba Al Mínimo. Se presentan los datos obtenidos en las pruebas realizas en ralenti.

Tabla 31.*Análisis oficial sin hidrógeno – prueba al mínimo*

Nº	Temp. Motor (°C)	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
1	87	670	0,12	15	0,54	28	1,02
2	91	680	0,04	15,1	0,46	55	1,018
3	91	660	0,03	15,1	0,43	55	1,017
4	82	690	0,58	13,9	1,38	195	1,041
5	90	660	0,04	15	0,53	40	1,022

Nota. La tabla muestra todos los valores obtenidos en el análisis de gases oficial en prueba al mínimo.

Datos – Análisis Oficial Sin Hidrógeno – Prueba En Aceleración. Los valores presentados se obtuvieron de la prueba en aceleración.

Tabla 32.*Análisis oficial sin hidrógeno – prueba en aceleración*

Nº	Temp. Motor (°C)	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
1	87	2510	0,7	14,7	0,13	64	0,983
2	91	2500	0,45	14,6	0,43	95	1,003
3	91	2580	0,29	14,9	0,44	83	1,009
4	82	2570	0,48	14,8	0,17	45	0,992
5	90	2580	0,24	15	0,48	62	1,013

Nota. La tabla detalla los datos obtenidos en 5 pruebas realizadas en el test de análisis de gases oficial.

Datos – Análisis Oficial Con Hidrógeno

Para los valores obtenidos por medio de la prueba de gases e instalado el generador de hidrógeno son los presentados a continuación.

Datos – Análisis Oficial Con Hidrógeno – Prueba Al Mínimo. Los valores presentados son para la prueba en mínimo.

Tabla 33.

Análisis oficial con hidrógeno – prueba al mínimo

Nº	Temp. Motor (°C)	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
1	89	690	0,29	14,3	1,2	148	1,043
2	91	690	0,03	14,7	0,53	44	1,023
3	91	690	0,05	14,9	0,49	29	1,02
4	92	740	0,06	14,8	0,51	61	1,02
5	92	650	0,02	14,9	0,51	37	1,022

Nota. La tabla señala los datos de Temp. Motor, RPM, CO, CO2, O2, HC y LAMBDA.

Datos – Análisis Oficial Con Hidrógeno – Prueba En Aceleración. Se presentan los datos obtenidos en la prueba en aceleración.

Tabla 34.

Análisis oficial con hidrógeno – prueba en aceleración

Nº	Temp. Motor (°C)	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
1	89	2520	0,61	14,3	0,66	143	1,007
2	91	2490	0,4	14,5	0,42	72	1,005

Nº	Temp. Motor (°C)	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
3	91	2520	0,35	14,8	0,31	65	1,002
4	92	2540	0,21	14,8	0,37	45	1,009
5	92	2400	0,29	14,8	0,48	62	1,011

Nota. La tabla presenta los datos obtenidos del análisis de gases oficial en un MEP con hidrógeno.

Comparación Y Análisis De Gases Oficial – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno –

Prueba Al Mínimo

Variación Prueba 1 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Para el análisis de gases oficial se realizaron 5 pruebas respectivamente con y sin generador de hidrógeno.

Tabla 35.

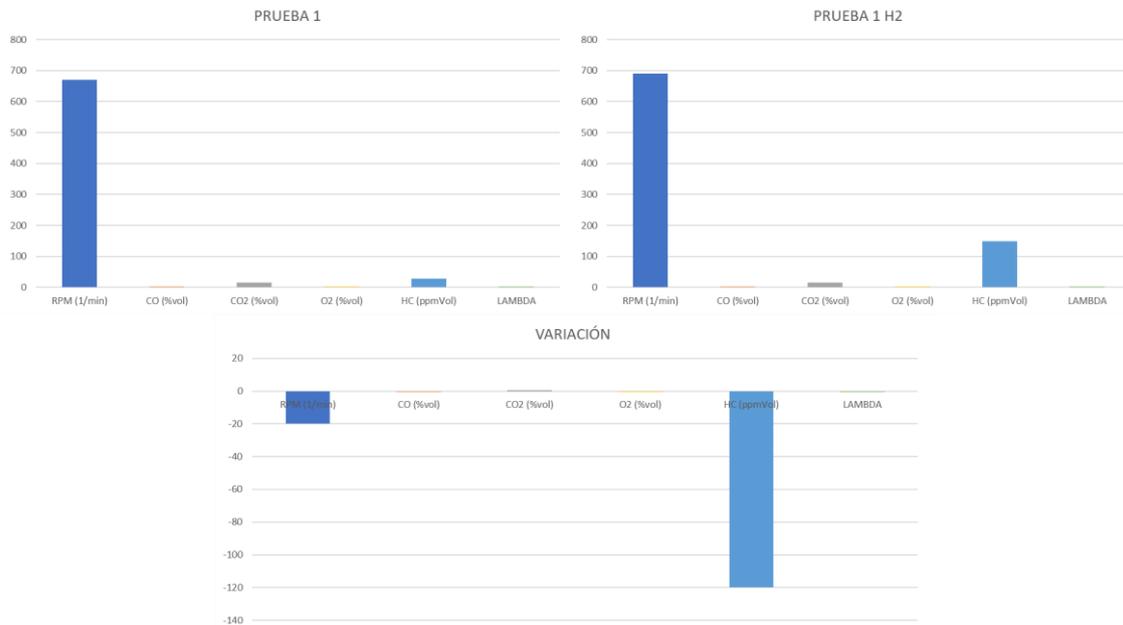
Prueba 1 – MEP – con H2 vs sin H2

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	670	0,12	15	0,54	28	1,02
Con hidrógeno	690	0,29	14,3	1,2	148	1,043
Diferencia	-20	-0,17	0,7	-0,66	-120	-0,023

Nota. La tabla muestra la variación en la prueba 1 de los datos obtenidos de un MEP con y sin hidrógeno.

Figura 57.

Prueba 1 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La gráfica señala la variación existente en la prueba 1 con y sin hidrógeno en un motor MEP.

Al realizar 5 test de análisis de gases oficial se tiene datos en prueba al mínimo y datos en prueba en aceleración, se observa datos de prueba en ralentí, así pues, se observa en un régimen en ralentí posee una gran variación de incremento en hidrocarburos (HC) cuando se tiene la presencia de hidrógeno en el MEP, de 28 ppmVol a 148 ppmVol de hidrocarburos, lo que muestra que no se está quemando una buena cantidad de combustible.

Variación Prueba 2 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Se obtuvieron datos de gases de escape como RPM, CO, CO2, O2, HC y LAMBDA los cuales fueron analizados en el mismo régimen de revoluciones del motor.

Tabla 36.*Prueba 2 – MEP – con H2 vs sin H2*

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	680	0,04	15,1	0,46	55	1,018
Con hidrógeno	690	0,03	14,7	0,53	44	1,023
Diferencia	-10	0,01	0,4	-0,07	11	-0,005

Nota. La tabla manifiesta los valores obtenidos en un test de gases oficial realizado en un MEP.

Figura 58.*Prueba 2 – MEP – con H2 vs sin H2*

Nota. La gráfica presenta las líneas de tendencia que se tiene o no al aplicar el hidrógeno en un MEP.

En la prueba 2 se muestra que no existe una gran diferencia entre los parámetros, es importante recalcar que el régimen del motor es en ralentí que está alrededor de los 680 RPM, así pues, no se tiene un gran flujo de hidrógeno en la admisión lo que causa que no se tenga un buen rango de diferencia en las mediciones, sin embargo, existe una variación notable en los hidrocarburos (HC) con 55 ppmVol sin hidrógeno y 44 ppmVol con hidrógeno, teniendo una variación en lambda.

Variación Prueba 3 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Los datos obtenidos del análisis de gases oficial con y sin hidrógeno son tabulados para ver la diferencia de gases de escape que existe entre sí.

Tabla 37.

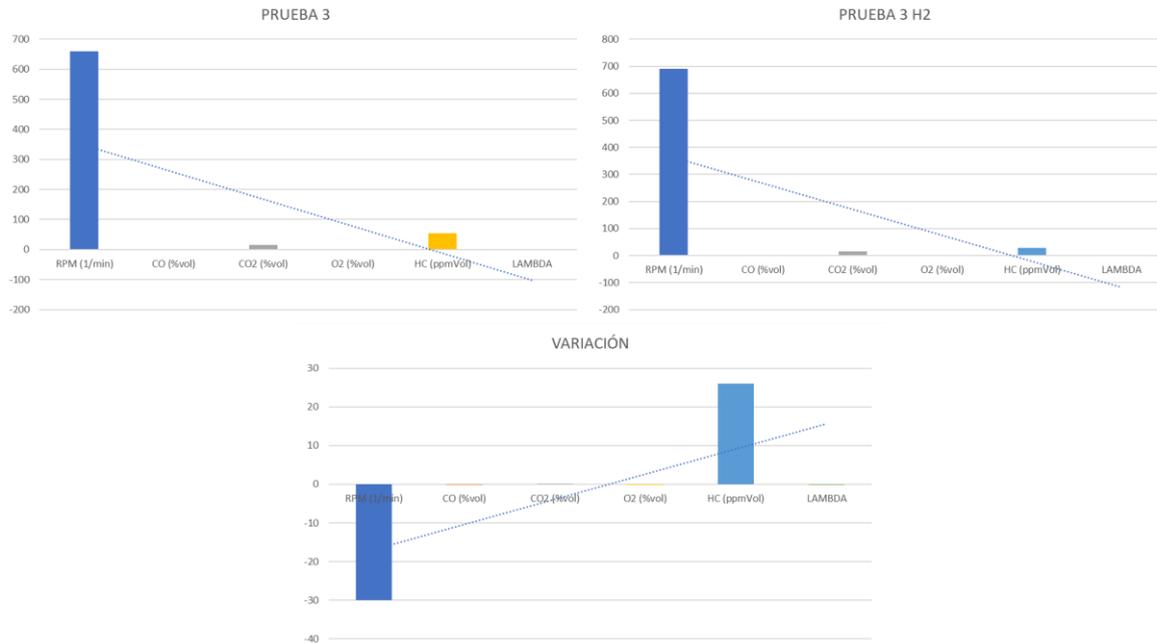
Prueba 3 – MEP – con H2 VS sin H2

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	660	0,03	15,1	0,43	55	1,017
Con hidrógeno	690	0,05	14,9	0,49	29	1,02
Diferencia	-30	-0,02	0,2	-0,06	26	-0,003

Nota. La tabla muestra la variación que se tiene en la prueba 3 de análisis de gases oficial.

Figura 59.

Prueba 3 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La gráfica presenta la variación de emisión de gases que existe la colocar hidrógeno en un MEP.

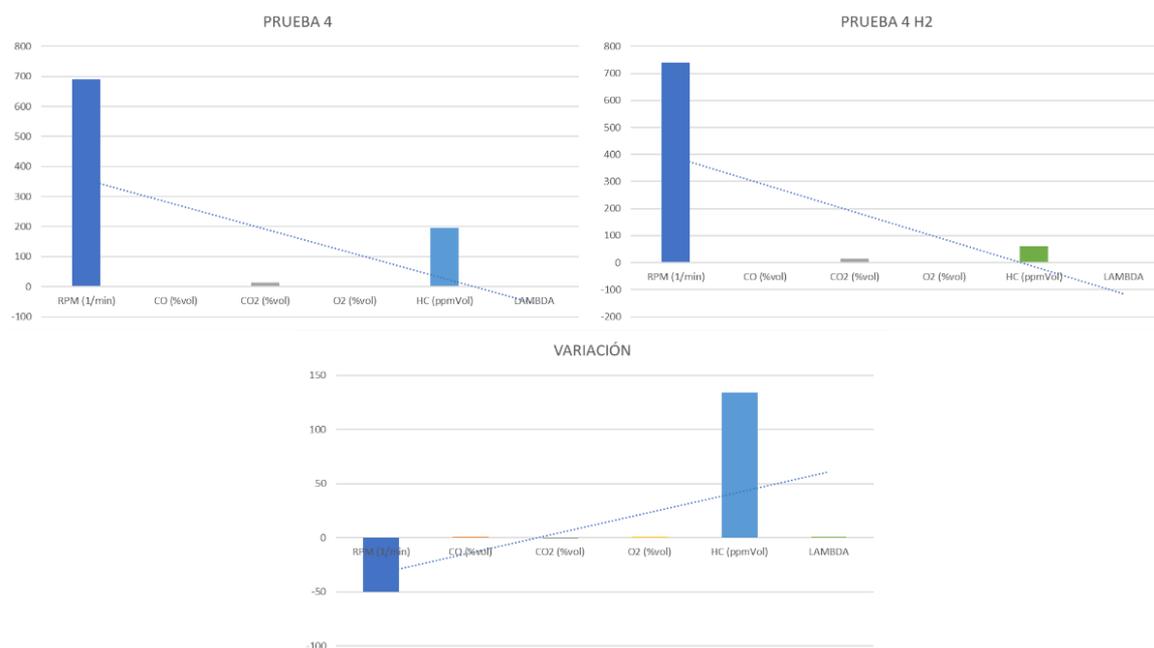
Al encontrar una variación de incremento de 0,003 en lambda cuando se tiene presencia de hidrógeno, llegando al valor de 1,02, va a existir una variación en los hidrocarburos (HC) que se hace notable, pues, sin hidrógeno se tiene 55 ppmVol de hidrocarburos y 29 ppmVol con el generador de hidrógeno trabajando cuando se encuentra en ralentí el MEP, así también el dióxido de carbono disminuye en 0,2 %Vol. llegando a un valor de 14,9 %Vol. con la presencia de hidrógeno.

Variación Prueba 4 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Se realizaron cinco pruebas en ralentí donde se encuentran valores de régimen de revolución alrededor de 700 RMP.

Tabla 38.*Prueba 4 – MEP – con H2 VS sin H2*

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	690	0,58	13,9	1,38	195	1,041
Con hidrógeno	740	0,06	14,8	0,51	61	1,02
Diferencia	-50	0,52	-0,9	0,87	134	0,021

Nota. La tabla expone los datos de RPM, CO, CO2 O2, HC y LAMBDA obtenidos en la prueba 4 realizadas en un MEP con y sin hidrógeno.

Figura 60.*Prueba 4 – MEP – con H2 vs sin H2*

Nota. La gráfica manifiesta el cambio de los datos que se obtienen a partir del análisis de gases oficial en el MEP con y sin hidrógeno.

En la prueba 4 se puede evidenciar la variación que existe en los datos obtenidos de régimen de revolución (RMP), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂), hidrocarburos (HC) y LAMBDA en presencia de hidrógeno introducido al MEP como un mejorador de combustión, como en ralentí no se tiene un caudal elevado de hidrógeno, no se evidencia un gran cambio en los valores medidos.

Variación Prueba 5 – MEP – Con H₂ Vs Sin H₂. Al implementar hidrógeno en un MEP los valores de gases de escape varían, es por eso necesario realizar 5 pruebas para sustentar estas variaciones en la prueba cinco.

Tabla 39.

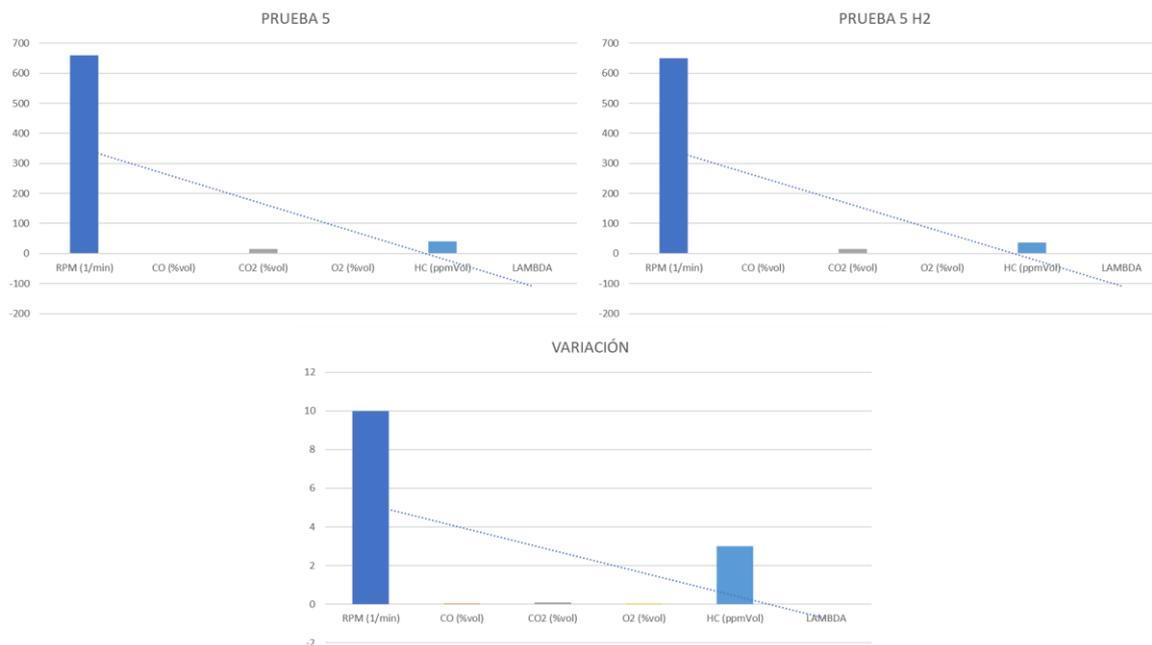
Prueba 5 – MEP – con H₂ VS sin H₂

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO₂ (%vol)	O₂ (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	660	0,04	15	0,53	40	1,022
Con hidrógeno	650	0,02	14,9	0,51	37	1,022
Diferencia	10	0,02	0,1	0,02	3	0

Nota. La tabla, detalla datos obtenidos por en la prueba 5 de un MEP por medio de un analizador de gases.

Figura 61.

Prueba 5 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La grafica señala las diferentes variaciones que se tiene al aplicar un generador de hidrógeno en un MEP.

En la gráfica de variación se observa que no existe un gran cambio en los datos obtenidos del análisis de gases con y sin hidrógeno, en este caso lambda 1,022 se mantiene constante en las dos pruebas, pero, se nota una variación en los hidrocarburos (HC) tiende a disminuir en 3 ppmVol llegando a un valor de 37 ppmVol de hidrocarburo en presencia de hidrógeno por el motivo que se llega a combustionar mejor el combustible con el hidrógeno.

Comparación Y Análisis De Gases Oficial – Con Hidrógeno Vs Sin Hidrógeno – Prueba En Aceleración

Variación Prueba 1 – Mep – Con H2 Vs Sin H2. El régimen de revolución para esta prueba es de 2500 RPM donde se puede encontrar ciertas variaciones.

Tabla 40.

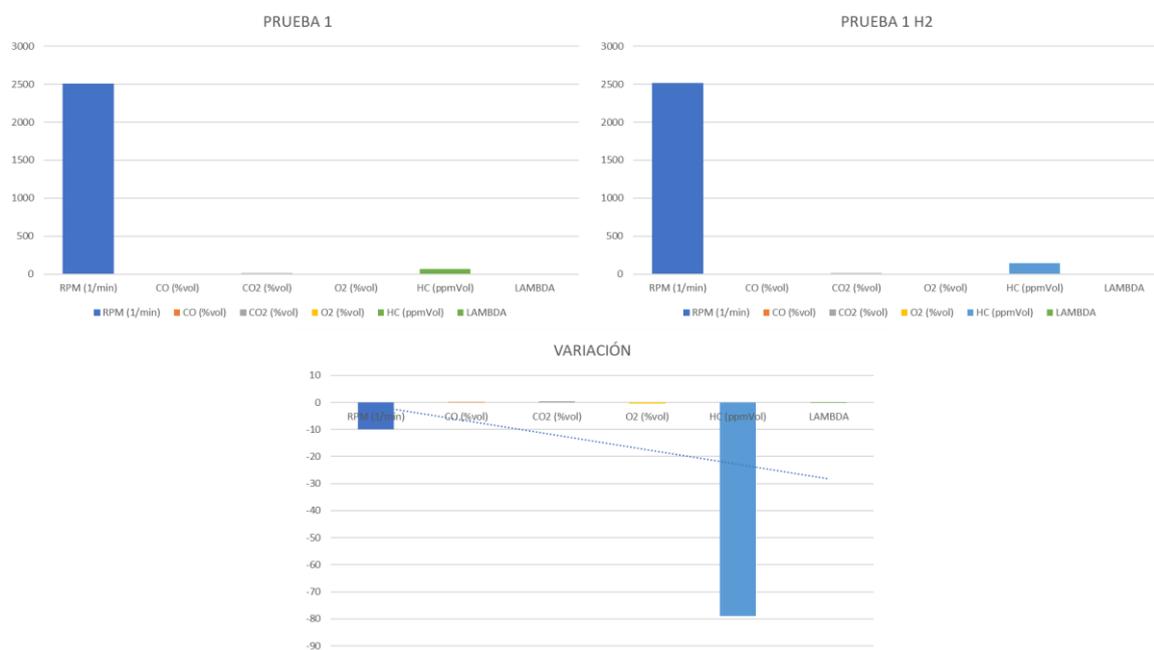
Prueba 1 – MEP – con H2 VS sin H2

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	2510	0,7	14,7	0,13	64	0,983
Con hidrógeno	2520	0,61	14,3	0,66	143	1,007
Diferencia	-10	0,09	0,4	-0,53	-79	-0,024

Nota. La tabla expone los datos obtenidos en el análisis de gases oficial en prueba de aceleración.

Figura 62.

Prueba 1 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La gráfica muestra la variación que se tiene al implementar un generador de hidrógeno en la admisión de un MEP.

En un régimen de revolución de 2500 se puede notar con mayor facilidad las variaciones que van a tener los gases de escape, a primera instancia se observa una gran variación en los hidrocarburos (HC) con hidrógeno aumentan en 79 ppmVol, llegando a 143 ppmVol con la presencia de H₂, al igual que aumenta el oxígeno (O₂) de 0,13 a 0,66 %Vol. y esto lleva que el porcentaje de dióxido de carbono disminuya de 14,7 a 14,3 %Vol. cuando el generador de hidrógeno está en funcionamiento.

Variación Prueba 2 – MEP – Con H₂ Vs Sin H₂. La aplicación de hidrógeno en un MEP influye directamente en los gases de escape como el CO, CO₂, O₂, HC y Lambda.

Tabla 41.

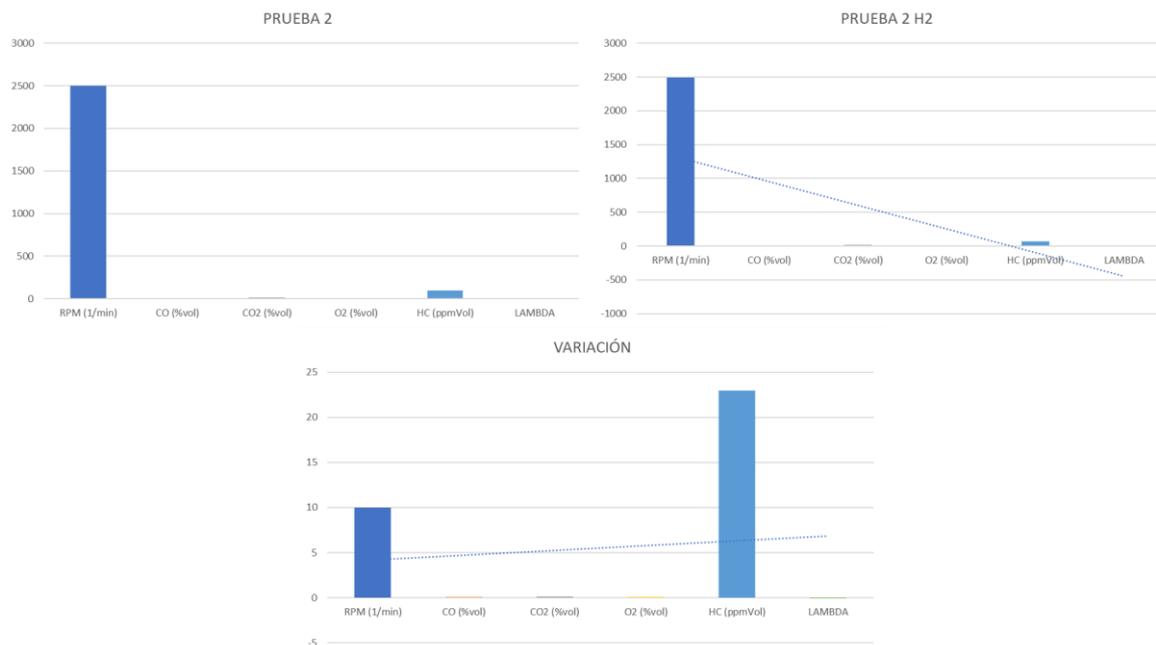
Prueba 2 – MEP – con H₂ VS sin H₂

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	2500	0,45	14,6	0,43	95	1,003
Con hidrógeno	2490	0,4	14,5	0,42	72	1,005
Diferencia	10	0,05	0,1	0,01	23	-0,002

Nota. Se realizó la variación que existe en los gases a un régimen de revolución de 2500 RPM.

Figura 63.

Prueba 2 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La gráfica expresa las diferentes variaciones que se tiene en los gases de escape como son RPM, CO, CO₂, O₂, HC y LAMBDA.

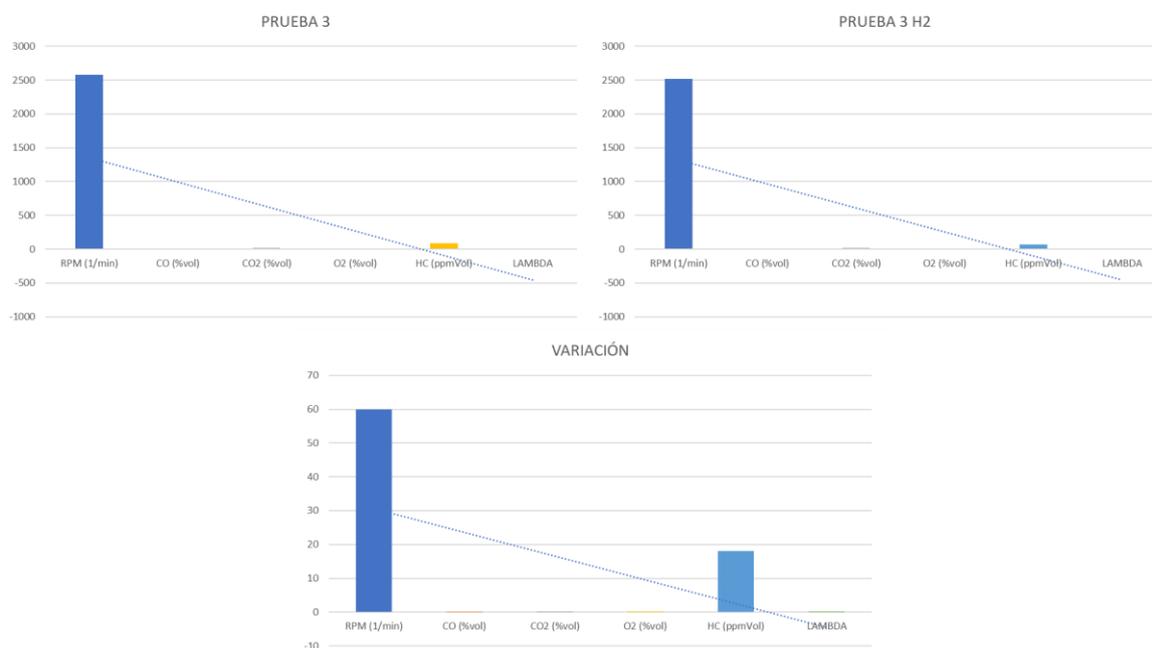
Al realizar la prueba 2 en primera instancia se puede observar una variación en los hidrocarburos (HC), sin presencia de hidrógeno se encuentra un valor de 95 ppmVol, poniendo en funcionamiento el generador de hidrógeno se encuentra 72 ppmVol de hidrocarburos, en este mismo se encuentra un incremento en lambda de 0,002 llegando así a 1,005 que muestra una mezcla pobre pero efectiva al momento de ser explotado el combustible.

Variación Prueba 3 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. La intervención del hidrógeno en la admisión de un MEP se ve reflejado directamente en los gases de escape como se presenta en la prueba 3.

Tabla 42.*Prueba 3 – MEP – con H2 VS sin H2*

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	2580	0,29	14,9	0,44	83	1,009
Con hidrógeno	2520	0,35	14,8	0,31	65	1,002
Diferencia	60	-0,06	0,1	0,13	18	0,007

Nota. La tabla señala los valores obtenidos en la prueba 3 realizada en un MEP en prueba de aceleración.

Figura 64.*Prueba 3 – MEP – con H2 vs sin H2*

Nota. La gráfica indica la fluctuación en los datos obtenidos en la prueba 3 en el análisis de gases.

En un régimen de revolución de 2500 se puede notar con mayor facilidad las variaciones que van a tener los gases de escape, a primera instancia se observa una gran variación en los hidrocarburos (HC) con hidrógeno disminuye en 18 ppmVol, llegando a 65 ppmVol con la presencia de H₂, al igual que disminuye el oxígeno (O₂) de 0,44 a 0,31 %Vol. y esto lleva que el porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) disminuya de 14,9 a 14,8 %Vol. cuando el generador de hidrógeno está en funcionamiento.

Variación Prueba 4 – MEP – Con H₂ Vs Sin H₂. En la variación de datos en la prueba 4 se encontraron gases de escape tales como monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, hidrocarburos realizando un el análisis de gases oficial.

Tabla 43.

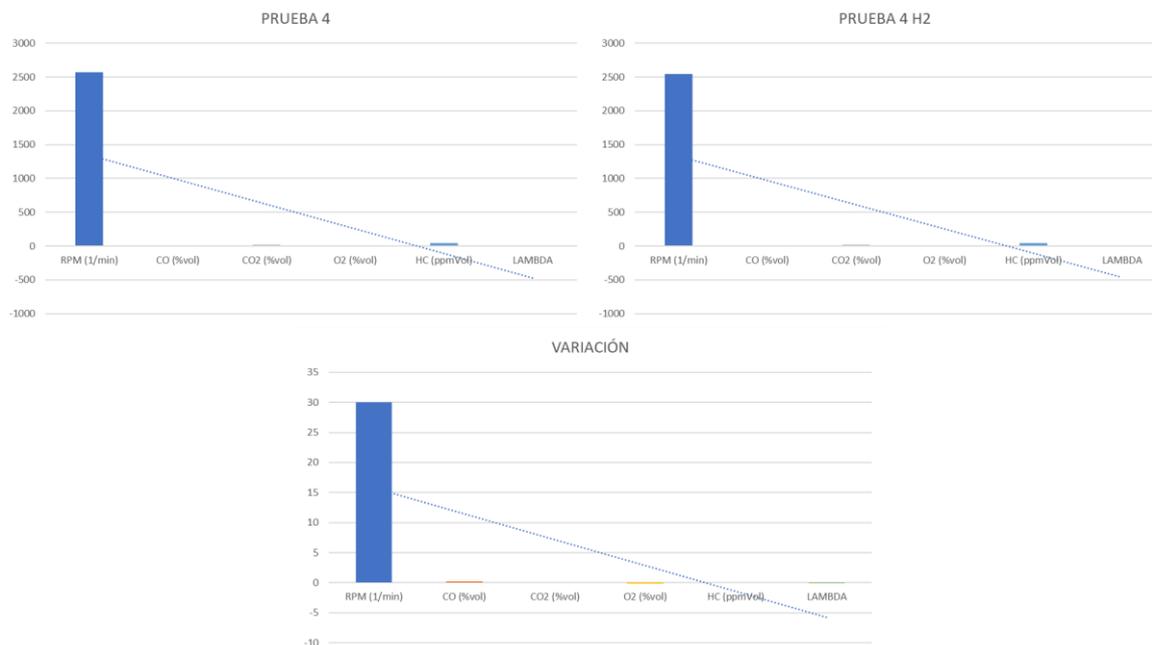
Prueba 4 – MEP – con H₂ VS sin H₂

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	2570	0,48	14,8	0,17	45	0,992
Con hidrógeno	2540	0,21	14,8	0,37	45	1,009
Diferencia	30	0,27	0	-0,2	0	-0,017

Nota. La tabla muestra que existe una variación de 30 RMP para la prueba 3 en prueba de aceleración.

Figura 65.

Prueba 4 – MEP – con H2 vs sin H2



Nota. La gráfica señala la variación existente en los gases de escape al implementar un generador de hidrógeno en un MEP.

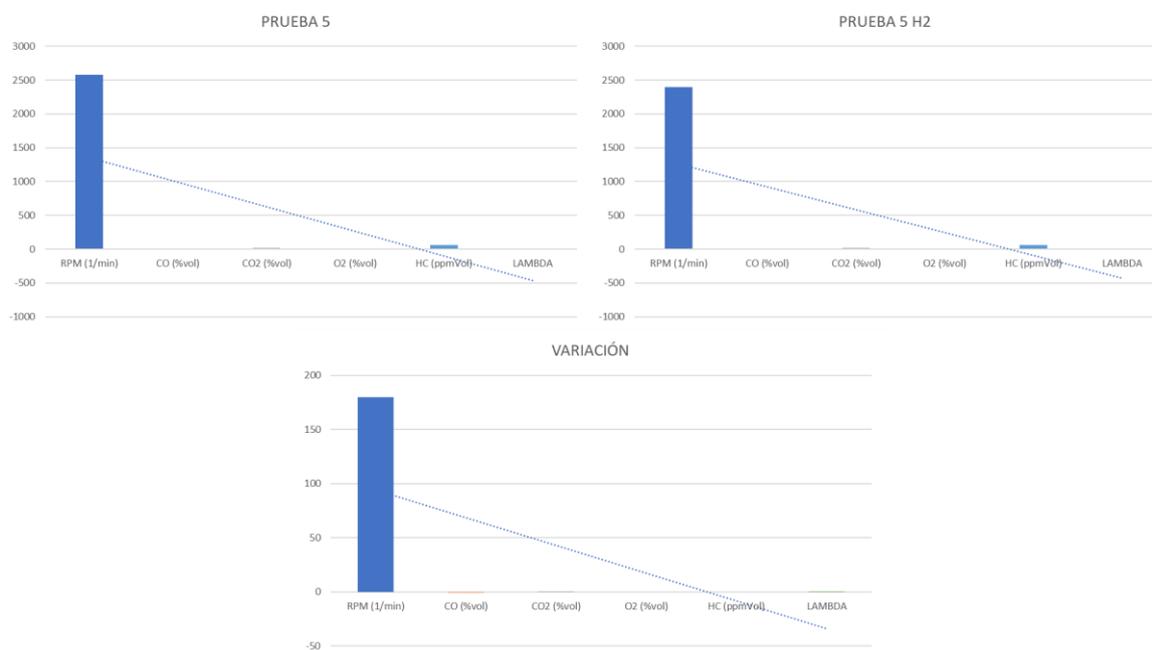
La presente gráfica muestra la variación que existe entre los gases de escape y la incidencia del hidrógeno en los mismos, se observa que el monóxido de carbono (CO) disminuye de 0,48 %Vol. a 0,21 %Vol. cuando el generador de hidrógeno se encuentra trabajando, los hidrocarburos (HC) se mantienen en 45 ppmVol, mientras que lambda aumenta en 0,017 en presencia de hidrógeno, llegando a 1,026 que para una mejor combustión se va a tener una mezcla pobre.

Variación Prueba 5 – MEP – Con H2 Vs Sin H2. Ciertos gases de escape se miden en %vol. de los cuales hay que analizar la variación que existe al implementar el generador de hidrógeno.

Tabla 44.*Prueba 5 – MEP – con H2 VS sin H2*

Prueba	RPM (1/min)	CO (%vol)	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ
Sin hidrógeno	2580	0,24	15	0,48	62	1,013
Con hidrógeno	2400	0,29	14,8	0,48	62	1,011
Diferencia	180	-0,05	0,2	0	0	0,002

Nota. La tabla designa los valores por RPM, CO, CO2, O2, HC, LAMBDA y cuando se encuentran estos con hidrógeno o sin hidrógeno.

Figura 66.*Prueba 5 – MEP – con H2 vs sin H2*

Nota. La gráfica presenta que en la prueba 5 de análisis de gases oficial se tiene variaciones debido a la implementación de un generador de hidrógeno en la admisión de un MEP.

La presente gráfica muestra la variación que existe entre los gases de escape y la incidencia del hidrógeno en los mismos, se observa que el monóxido de carbono (CO) aumenta de 0,24 %Vol. a 0,29 %Vol. cuando el generador de hidrógeno se encuentra trabajando, los hidrocarburos (HC) se mantienen en 62 ppmVol, mientras que lambda disminuye en 0,002 en presencia de hidrógeno, llegando a 1,011 que para una mejor combustión se va a tener una mezcla pobre.

MEP - Variación De Datos CO2 – O2

MEP - Variación De Datos CO2 – O2 Prueba Al Mínimo. La tabla 45 describe la variación que existe entre el dióxido de carbono y el oxígeno presente en las 5 pruebas con y sin hidrógeno.

Tabla 45.

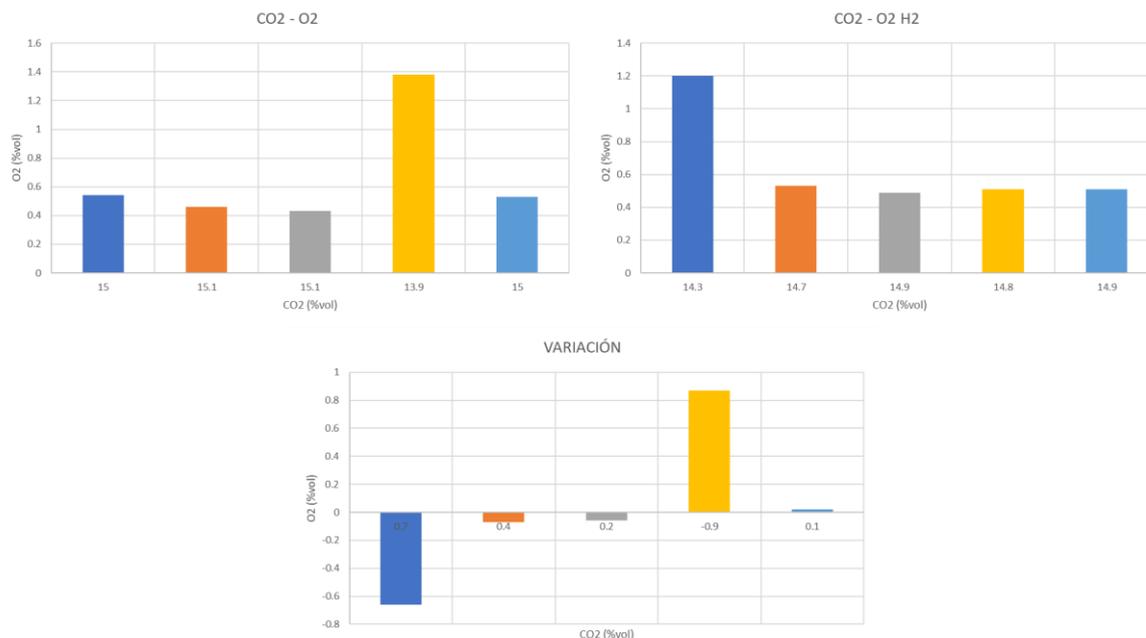
Variación de datos CO2 – O2 prueba al mínimo

Análisis de gases			Análisis de gases (H ₂)			Variación		
Nº	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	Nº	CO2 (%vol)	O2 (%vol)	Nº	CO2 (%vol)	O2 (%vol)
1	15	0,54	1	14,3	1,2	1	0,7	-0,66
2	15,1	0,46	2	14,7	0,53	2	0,4	-0,07
3	15,1	0,43	3	14,9	0,49	3	0,2	-0,06
4	13,9	1,38	4	14,8	0,51	4	-0,9	0,87
5	15	0,53	5	14,9	0,51	5	0,1	0,02

Nota. La tabla presenta la variación que existe en los gases CO2 y O2 existentes en una tabulación de 5 pruebas.

Figura 67.

Resultados y variación CO2 - O2 prueba al mínimo



Nota. La gráfica demuestra la variación de los gases de escape CO2 y O2.

Los datos que se observan en el análisis de gases con hidrógeno muestran que el dióxido de carbono (CO2) disminuye y que la presencia de oxígeno aumenta, cogiendo el rango de 15 %Vol. de dióxido de carbono se realiza una comparativa que sin hidrógeno se tiene un valor de 0,54 %Vol. de oxígeno (O2), mientras que trabajando el generador de hidrógeno se tiene un rango de 0,49 %Vol. de oxígeno.

MEP - Variación De Datos CO2 – O2 Prueba En Aceleración. Las cinco pruebas realizadas dan valores de gases de escape de dióxido de carbono y oxígeno.

Tabla 46.

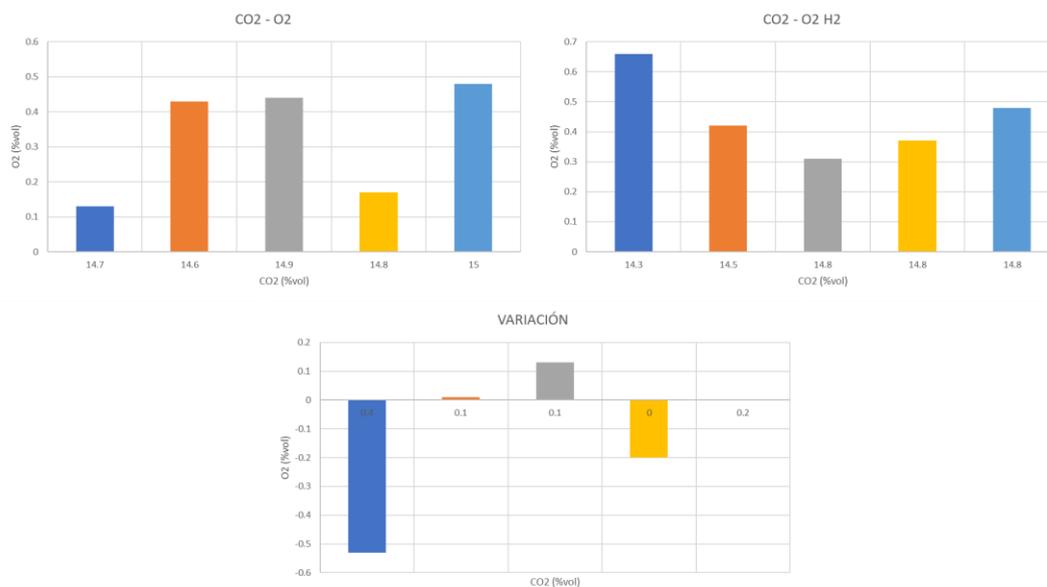
Variación de datos CO₂ – O₂ prueba en aceleración

Análisis de gases			Análisis de gases (H ₂)			Variación		
Nº	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)	Nº	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)	Nº	CO ₂ (%vol)	O ₂ (%vol)
1	14,7	0,13	1	14,3	0,66	1	0,4	-0,53
2	14,6	0,43	2	14,5	0,42	2	0,1	0,01
3	14,9	0,44	3	14,8	0,31	3	0,1	0,13
4	14,8	0,17	4	14,8	0,37	4	0	-0,2
5	15	0,48	5	14,8	0,48	5	0,2	0

Nota. La tabla presenta los datos que se obtiene al realizar el test de análisis de gases oficial con prueba en aceleración.

Figura 68.

Resultados y variación CO₂ - O₂ prueba en aceleración.



Nota. La gráfica indica los cambios que tiene los gases de escape en prueba de aceleración.

Al tener la prueba en aceleración se muestra la variación que existe entre el dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂) con y sin hidrógeno, se observa que cuando el hidrógeno está actuando se tiene tres valores similares de dióxido de carbono que es 14,8 %Vol. y los valores de oxígeno varían, así, hay valores de 0,31 a 0,48 %Vol. de oxígeno y realizando otra comparación con el mismo valor de dióxido de carbono, pero ahora sin hidrógeno, el valor que da es de 0,17 %Vol. de oxígeno.

MEP - Variación De Datos Lambda – HC

MEP - Variación De Datos Lambda - HC Prueba Al Mínimo. Las pruebas fueron realizadas en un régimen de revolución en ralentí, de ahí se obtiene gases de escape donde se tiene HC que es comparado con Lambda.

Tabla 47.

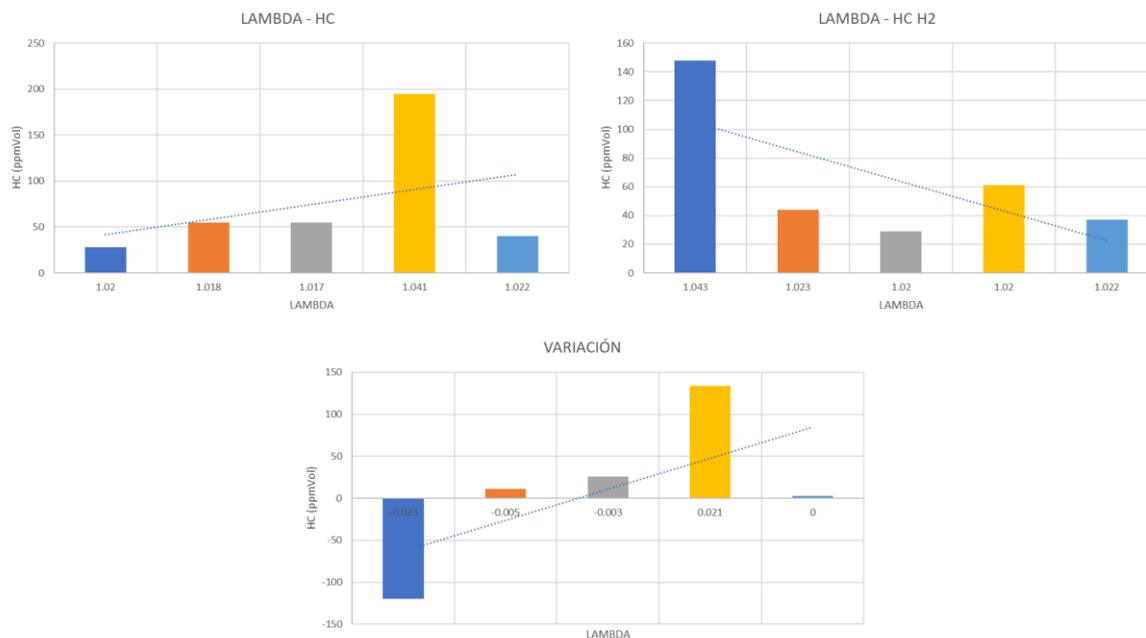
Variación de datos Lambda - HC prueba al mínimo

Análisis de gases			Análisis de gases H ₂			Variación		
Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)
1	1,02	28	1	1,043	148	1	-0,023	-120
2	1,018	55	2	1,023	44	2	-0,005	11
3	1,017	55	3	1,02	29	3	-0,003	26
4	1,041	195	4	1,02	61	4	0,021	134
5	1,022	40	5	1,022	37	5	0	3

Nota. La tabla muestra la prueba en mínimo realizada en un MEP en dos etapas, primero sin hidrógeno y segundo con hidrógeno.

Figura 69.

Resultados y variación lambda - HC prueba al mínimo



Nota. La gráfica señala la variación que existe entre los datos obtenidos mediante el análisis de gases oficial.

En la gráfica se observa los datos de lambda e hidrocarburos (HC) obtenidos en 5 pruebas con y sin hidrógeno, se puede evidenciar que el valor de lambda ronda al valor de 1,02 y se nota una gran variación en la prueba 1 referente al nivel de hidrocarburos con una variación de 120 ppmVol, haciendo referencia a un mismo valor de lambda de 1,02 se muestra que cuando no existe H2 se puede tener hidrocarburos con un valor de 28 ppmVol y 29 ppmVol de hidrocarburos en presencia de hidrógeno, se observa que no existe una gran variación.

MEP - Variación De Datos Lambda - HC Prueba En Aceleración. Para el análisis de gases en aceleración, el equipo de evaluación menciona el régimen de revoluciones que hay que llevar al motor, de ahí se obtienen datos de Lambda e hidrocarburos.

Tabla 48.

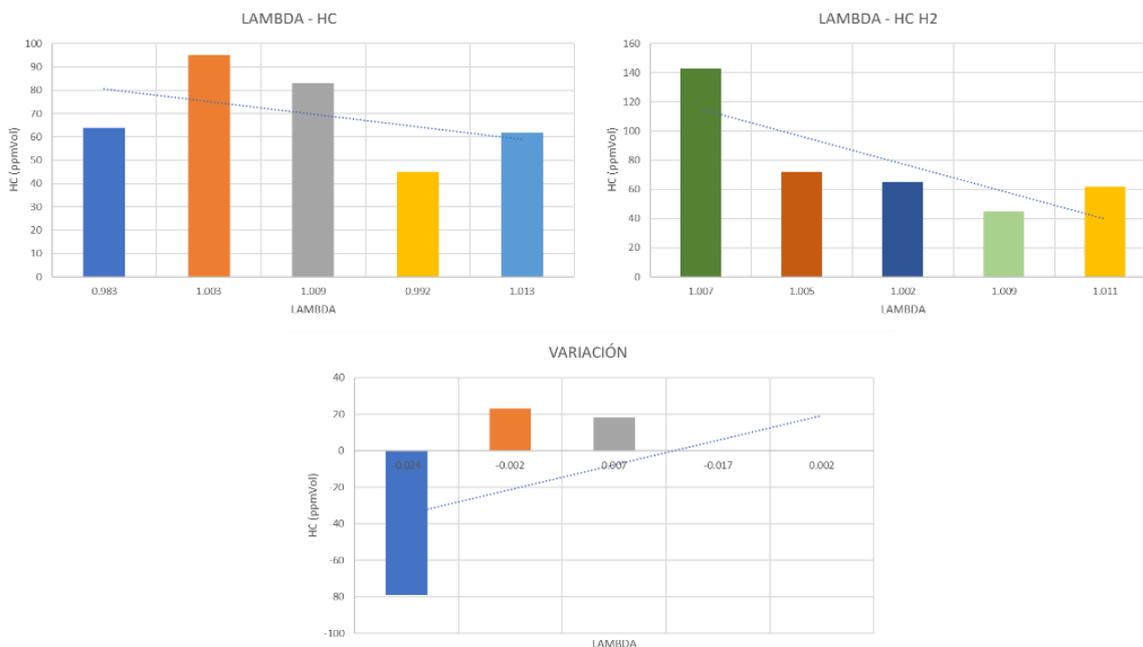
Variación de datos Lambda - HC prueba en aceleración

Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)	Nº	λ	HC (ppmVol)
1	0,983	64	1	1,007	143	1	-0,024	-79
2	1,003	95	2	1,005	72	2	-0,002	23
3	1,009	83	3	1,002	65	3	0,007	18
4	0,992	45	4	1,009	45	4	-0,017	0
5	1,013	62	5	1,011	62	5	0,002	0

Nota. La tabla muestra los valores obtenidos para una prueba en aceleración en un MEP.

Figura 70.

Resultados y variación lambda - HC prueba en aceleración



Nota. La gráfica expone una variación existente en los gases de escape.

Se observa que sin presencia de hidrógeno lambda tiene a ser menor a uno, lo que muestra que se tiene una mezcla rica, esto se debe a que el hidrógeno ayuda a tener una mejor combustión al momento de ignición en el MEP, tomando el valor de 1,009 en lambda se analiza los hidrocarburos (HC), en el caso de no tener activado el generador de hidrógeno se muestra 83 ppmVol de hidrocarburos, en cambio con el hidrógeno entrando por admisión se tiene 45 ppmVol de hidrocarburos demostrando que los hidrocarburos son combustionados de mejor manera con la presencia del hidrógeno.

MEP - Variación De Datos Lambda – CO2 - HC

MEP - Variación De Datos Lambda – CO2 - HC Prueba Al Mínimo. El analizador de gases refleja valores en ralentí, entre ellos se encuentra datos como Lambda, dióxido de carbono e hidrocarburos.

Tabla 49.

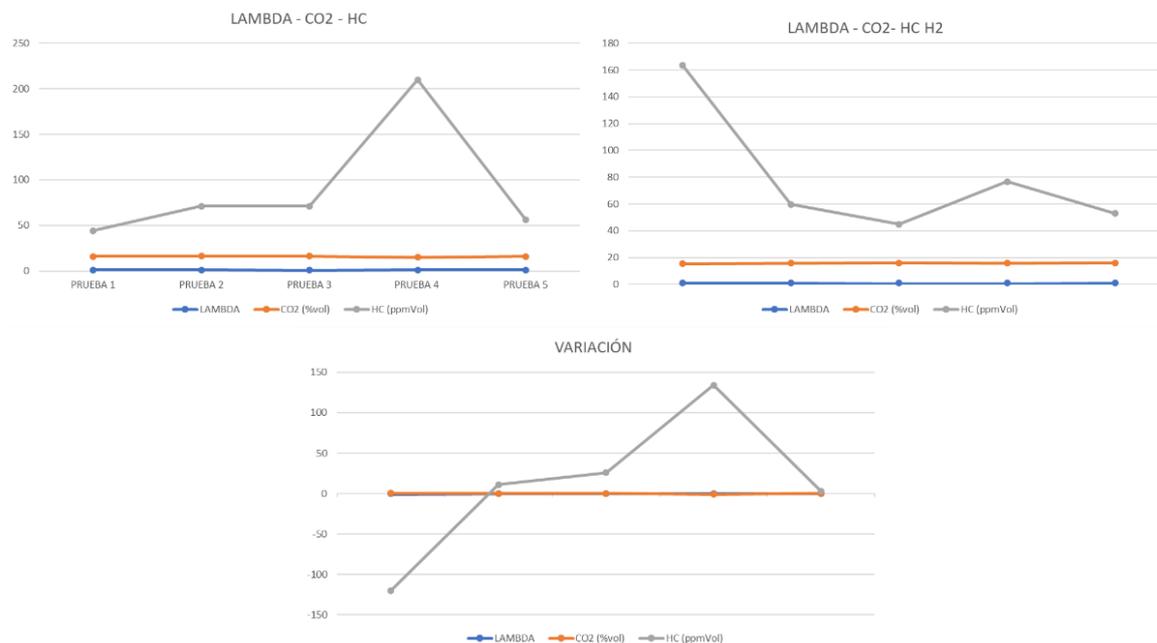
Variación de datos Lambda – CO2 - HC prueba al mínimo

Nº	Análisis de gases			Análisis de gases (H ₂)			Variación		
	λ	CO ₂ (%vol)	HC (ppmVol)	λ	CO ₂ (%vol)	HC (ppmVol)	λ	CO ₂ (%vol)	HC (ppmVol)
1	1,02	15	28	1,043	14,3	148	-0,023	0,7	-120
2	1,018	15,1	55	1,023	14,7	44	-0,005	0,4	11
3	1,017	15,1	55	1,02	14,9	29	-0,003	0,2	26
4	1,041	13,9	195	1,02	14,8	61	0,021	-0,9	134
5	1,022	15	40	1,022	14,9	37	0	0,1	3

Nota. La tabla indica los datos de LAMBDA, CO2 y HC provenientes de 5 pruebas realizadas en el test de análisis de gases oficial.

Figura 71.

Resultados Y Variación Lambda - CO2 - HC Prueba Al Mínimo



Nota. La gráfica presenta los trazos obtenidos a partir del análisis de gases oficial.

En la presente gráfica se observa que el valor de 1,022 en lambda se encuentra en los datos con y sin hidrógeno, es ahí la variación que se encuentra referente al dióxido de carbono (CO₂), los valores que se determinan son 15 %Vol. y 14,9%Vol que no se ve reflejado en un cambio notable al utilizar o no hidrógeno con los valores dados respectivamente, con el caso de hidrocarburos (HC) sin la presencia de hidrógeno se tiene 40 ppmVol y con el generador funcionando se obtiene 37 ppmVol dando muy poca variación.

MEP - Variación De Datos Lambda – CO₂ - HC Prueba En Aceleración. La variación que se encuentra en los gases de escape al implementar un generador de hidrógeno en un MEP a cierto régimen de revolución.

Tabla 50.

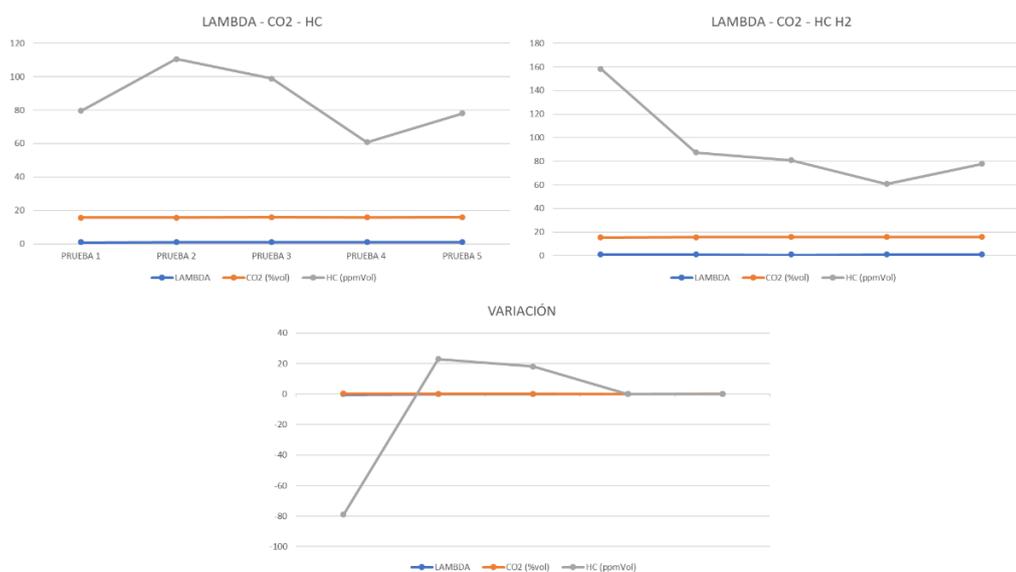
Variación de datos Lambda – CO2 - HC prueba en aceleración

Nº	Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
	λ	CO2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ	CO2 (%vol)	HC (ppmVol)	λ	CO2 (%vol)	HC (ppmVol)
1	0,983	14,7	64	1,007	14,3	143	-0,024	0,4	-79
2	1,003	14,6	95	1,005	14,5	72	-0,002	0,1	23
3	1,009	14,9	83	1,002	14,8	65	0,007	0,1	18
4	0,992	14,8	45	1,009	14,8	45	-0,017	0	0
5	1,013	15	62	1,007	14,3	143	-0,024	0,4	-79

Nota. La tabla expone sobre los datos obtenidos en un test de análisis de gases con prueba en aceleración.

Figura 72.

Resultados y variación lambda - CO2 - HC prueba en aceleración



Nota. La gráfica demuestra la variación que existe en los trazos del análisis de gases oficial en una prueba en aceleración.

El punto 1,009 en lambda muestra una semejante dada en el testeo con el dióxido de carbono (CO₂) ya que presenta 14,8 %Vol. de este y una variación solamente en los hidrocarburos (HC), así pues, sin el generador de hidrógeno trabajando se tiene 83 ppmVol de hidrocarburos y con la presencia de hidrógeno se tiene 45 ppmVol de hidrocarburos, así mostrando que el hidrógeno disminuye las emisiones de hidrocarburos.

MEP - Variación De Datos CO – O₂

MEP - Variación De Datos CO – O₂ Prueba Al Mínimo. Los datos de monóxido de carbono y oxígeno se presentan en la tabla 35 en cada una de las cinco pruebas realizadas.

Tabla 51.

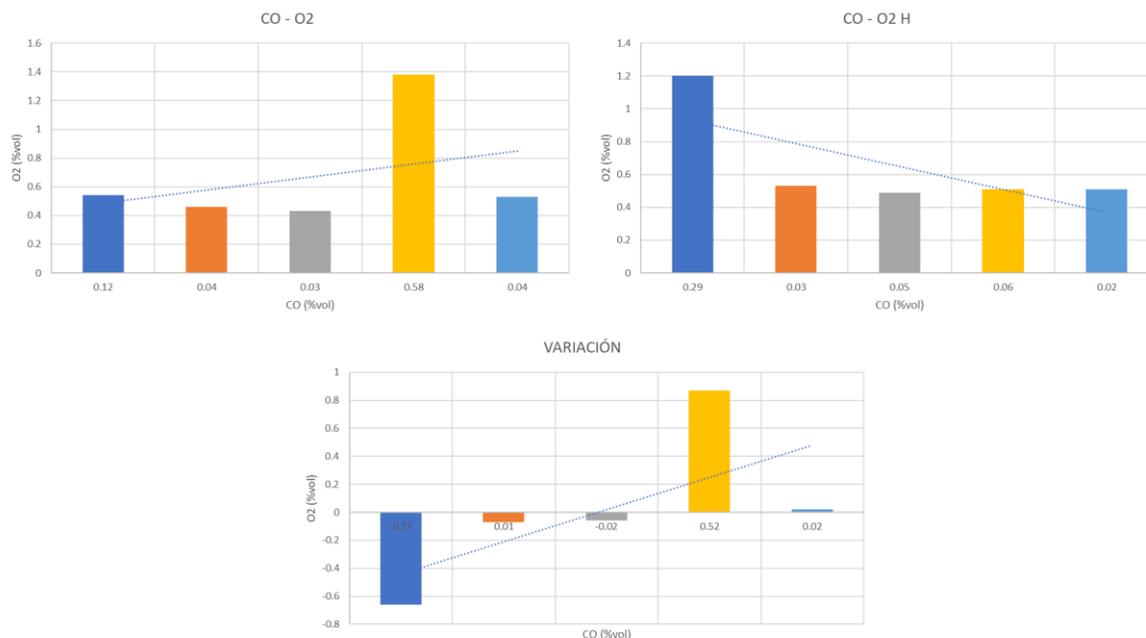
Variación de datos CO – O₂ prueba al mínimo

Análisis de gases			Análisis de gases (H₂)			Variación		
Nº	CO	O₂	Nº	CO	O₂	Nº	CO	O₂
	(%vol)	(%vol)		(%vol)	(%vol)		(%vol)	(%vol)
1	0,12	0,54	1	0,29	1,2	1	-0,17	-0,66
2	0,04	0,46	2	0,03	0,53	2	0,01	-0,07
3	0,03	0,43	3	0,05	0,49	3	-0,02	-0,06
4	0,58	1,38	4	0,06	0,51	4	0,52	0,87
5	0,04	0,53	5	0,02	0,51	5	0,02	0,02

Nota. La tabla demuestra los datos que se obtuvieron en prueba al mínimo para ver la variación en CO – O₂.

Figura 73.

Resultados y variación CO – O2 prueba al mínimo



Nota. La gráfica muestra los resultados obtenidos de la diferencia entre los gases con y sin la aplicación de un generador de hidrógeno en un MEP.

Mediante la tabla se muestra la variación existente en las dos pruebas realizadas con el test de analizador de gases oficial, donde se muestra los valores de los gases de escape obtenidos en la medición de un generador de hidrógeno, obteniendo información de pruebas al mínimo y pruebas en aceleración, mostrando los datos de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O2), el valor de 0,03 %Vol. en el monóxido de carbono se encuentra presente en las pruebas con y sin hidrógeno, así se obtiene los valores de 0,43 %Vol. de oxígeno sin la presencia de hidrógeno y 0,53 %Vol. con el generador en funcionamiento.

MEP – Variación De Datos CO – O2 Prueba En Aceleración. Los informes generados por el analizador de gases muestran los datos obtenidos en un régimen de ralentí y en aceleración, en la tabla 52 en cambio se muestran los de monóxido de carbono y oxígeno dados en una prueba en aceleración.

Tabla 52.

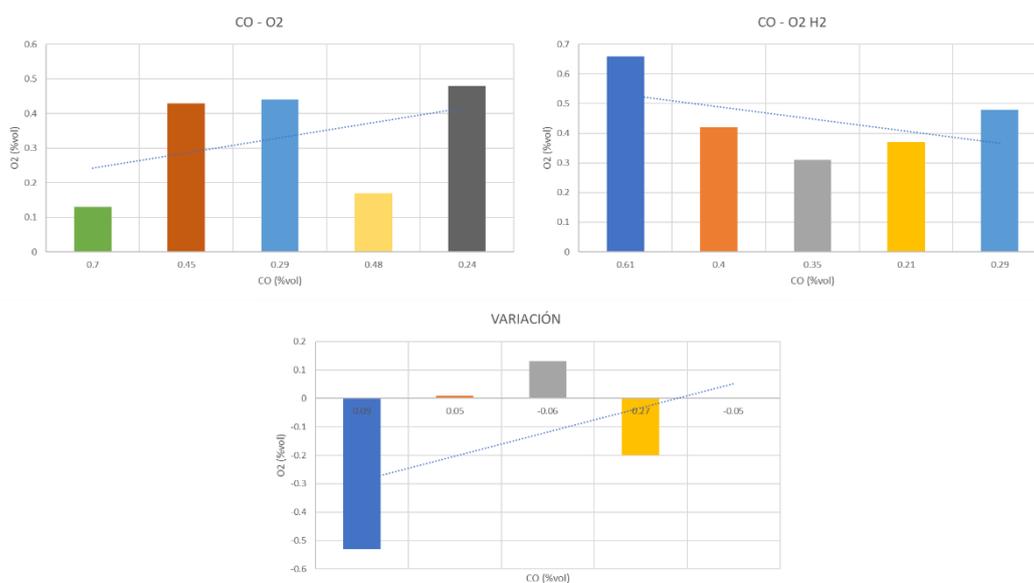
Variación de datos CO – O2 prueba en aceleración

Análisis de gases			Análisis de gases (H ₂)			Variación		
Nº	CO (%vol)	O2 (%vol)	Nº	CO (%vol)	O2 (%vol)	Nº	CO (%vol)	O2 (%vol)
1	0,7	0,13	1	0,61	0,66	1	0,09	-0,53
2	0,45	0,43	2	0,4	0,42	2	0,05	0,01
3	0,29	0,44	3	0,35	0,31	3	-0,06	0,13
4	0,48	0,17	4	0,21	0,37	4	0,27	-0,2
5	0,24	0,48	5	0,29	0,48	5	-0,05	0

Nota. La tabla presenta los datos obtenidos de 5 pruebas realizadas en un MEP con y sin hidrógeno.

Figura 74.

Resultados y variación CO - O2 prueba en aceleración



Nota. La gráfica indica la variación existente en los gases de escape al implementar un generador de hidrógeno en un MEP.

La gráfica muestra un valor de 0,29 %Vol. en común de monóxido de carbono (CO) con y sin hidrógeno presente, a partir de este dato se analiza que sin la presencia de hidrógeno se tiene un valor de 0,44 %Vol. de O₂ y cuando este se está introduciendo se obtiene 0,48 %Vol. al MEP, de tal manera que, si el valor del monóxido de carbono sube, el valor del oxígeno va a descender.

MEP - Variación De Datos Lambda – CO2

MEP - Variación De Datos Lambda – CO2 Prueba Al Mínimo. Para una buena mezcla aire – combustible se establece que el valor de lambda debe oscilar en valores mayores a 1 como se muestra en la tabla 53.

Tabla 53.

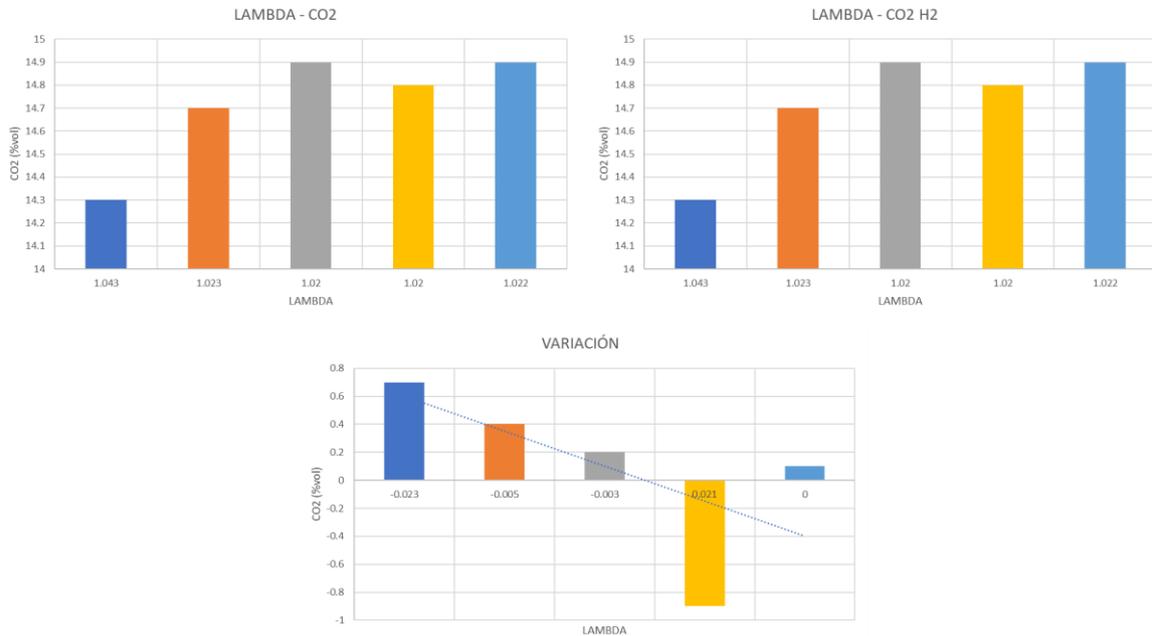
Variación de datos Lambda – CO2 prueba al mínimo

Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
Nº	λ	CO2 (%vol)	Nº	λ	CO2 (%vol)	Nº	λ	CO2 (%vol)
1	1,02	15	1	1,043	14,3	1	-0,023	0,7
2	1,018	15,1	2	1,023	14,7	2	-0,005	0,4
3	1,017	15,1	3	1,02	14,9	3	-0,003	0,2
4	1,041	13,9	4	1,02	14,8	4	0,021	-0,9
5	1,022	15	5	1,022	14,9	5	0	0,1

Nota. La tabla indica los datos de variación dados en un test de análisis de gases oficial a partir de 5 pruebas.

Figura 75.

Resultados y variación Lambda - CO2 prueba al mínimo



Nota. La gráfica señala la fluctuación que existe entre los puntos de varianza en los gases de escape.

Para un valor de lambda de 1,02 con presencia de hidrógeno se tiene 15 %Vol. de dióxido de carbono (CO₂), en comparación con el valor de 1,02 de lambda sin hidrógeno se tiene 14,9 %Vol. de dióxido de carbono y en la gráfica de variación se observa que la diferencia es mínima referente al cambio que tenga con hidrógeno cuando se compara el dióxido de carbono con lambda.

MEP - Variación De Datos Lambda – CO₂ Prueba En Aceleración. La variación se la realizó mediante una diferencia entre los datos obtenidos de lambda y dióxido de carbono cuando el MEP se encuentra sin hidrógeno, y posteriormente implementado el generador del mismo.

Tabla 54.

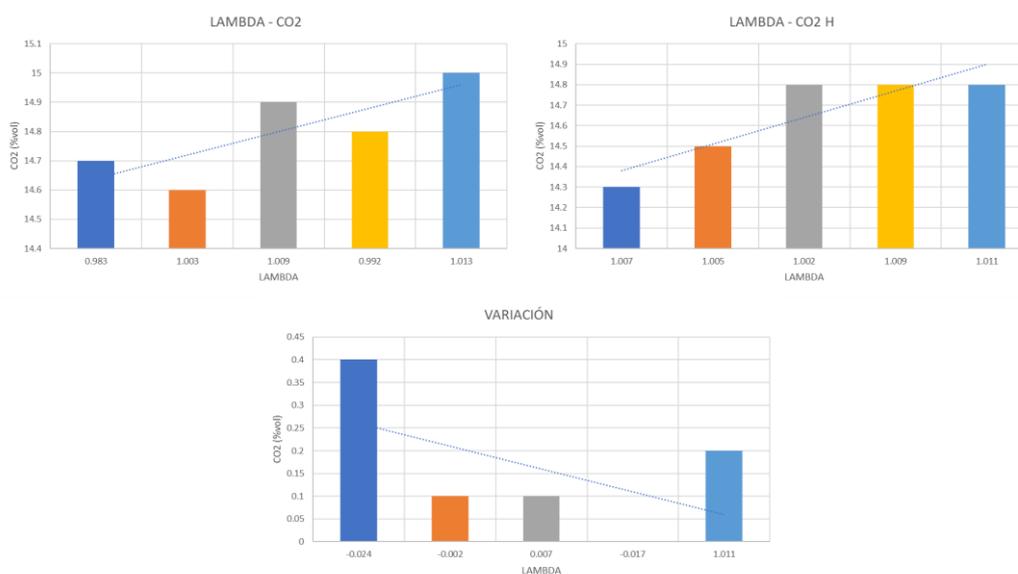
Variación de datos Lambda – CO2 prueba en aceleración

Análisis de gases			Análisis de gases (H_2)			Variación		
Nº	λ	CO2 (%vol)	Nº	λ	CO2 (%vol)	Nº	λ	CO2 (%vol)
1	0,983	14,7	1	1,007	14,3	1	-0,024	0,4
2	1,003	14,6	2	1,005	14,5	2	-0,002	0,1
3	1,009	14,9	3	1,002	14,8	3	0,007	0,1
4	0,992	14,8	4	1,009	14,8	4	-0,017	0
5	0,983	14,7	5	1,007	14,3	5	-0,024	0,4

Nota. La tabla demuestra los datos de LAMBDA y CO2 en prueba en aceleración dado por 5 tabulaciones en un MEP.

Figura 76.

Resultados y variación Lambda - CO2 prueba en aceleración



Nota. La grafica muestra el cambio en la línea de tendencia al implementar hidrógeno en un MEP.

La gráfica muestra la variación que existe en lambda al estar utilizando el generador de hidrógeno en un MEP, se visualiza como en el caso de no tener existencia de hidrógeno la ECU evalúa los parámetros de funcionamiento y envía una mezcla rica para un mejor encendido de la mezcla aire – combustible y en el caso de existir hidrógeno, lambda tiende a ser superior a uno, lo que indica que es una mezcla pobre y de esa manera es un ahorro de combustible.

MEC – Medición De Opacidad

Las pruebas realizadas mediante la medición de opacidad se realizan con dos regímenes de revolución, uno es en ralentí y el otro en gobernada, dando como resultado la opacidad que muestra en unidades de porcentaje, también se realizó el cálculo de la Ley de Beer-Lambert para la transmitancia.

Datos - Medición De Opacidad Sin Hidrógeno

Se realizó 5 pruebas de medición de opacidad en un MEC sin la activación del generador de hidrógeno y se obtuvo los siguientes datos.

Tabla 55.

Medición de opacidad sin hidrógeno

Análisis de opacidad						
Nº	RPM ralentí (RPM)	RPM gobernado (RPM)	Prueba Ensayo (%)	Opacidad (%)	Transmitancia (%)	NO (ppm vol)
1	714	4351	3,48	2,77	0,9723	78
2	713	4372	2,45	2,27	0,9773	53
3	714	4368	1,81	1,81	0,9819	42
4	708	4370	2,97	2,34	0,9766	23
5	713	4373	2,25	1,79	0,9821	29

Nota. La tabla muestra datos obtenidos a partir de la medición de opacidad sin presencia de hidrógeno en admisión.

Datos - Medición De Opacidad Con Hidrógeno

Se realizó 5 pruebas de medición de opacidad en un MEC con la activación del generador de hidrógeno y se obtuvo los siguientes datos.

Tabla 56.

Medición de opacidad con hidrógeno

Análisis de opacidad H_2					
Nº	RPM ralentí (RPM)	RPM gobernado (RPM)	Prueba Ensayo (%)	Opacidad (%)	Transmitancia (%)
1	714	4368	3,71	3,07	0,9693
2	705	4367	3,33	2,72	0,9728
3	705	4367	3,1	2,15	0,9785
4	710	4368	2,29	1,83	0,9817
5	714	4367	2,04	1,8	0,982

Nota. La tabla presenta los datos obtenidos a partir de la medición de opacidad con hidrógeno en admisión.

Comparación De Valores Obtenidos

La medición de opacidad se realiza en vehículos con MEC, la opacidad está en unidades de porcentaje.

Tabla 57.

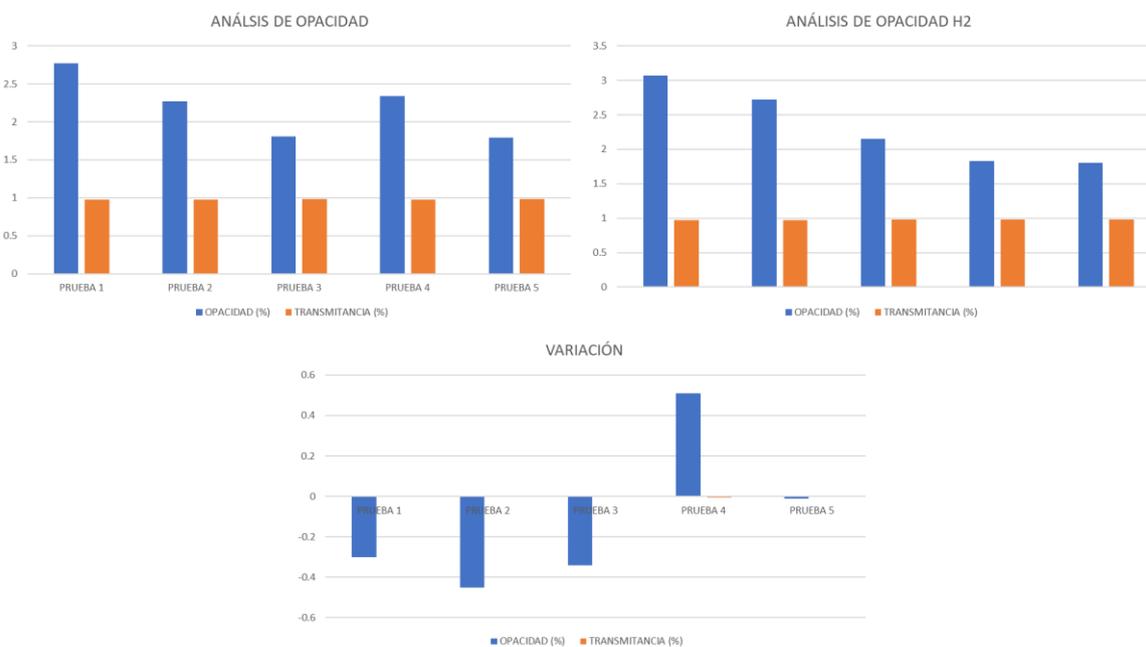
Variación de valores obtenidos

Variación					
N ^o	RPM ralentí (RPM)	RPM gobernado (RPM)	Prueba Ensayo (%)	Opacidad (%)	Transmitancia (%)
1	0	-17	-0,23	-0,3	0,003
2	8	5	-0,88	-0,45	0,0045
3	9	1	-1,29	-0,34	0,0034
4	-2	2	0,68	0,51	-0,0051
5	-1	6	0,21	-0,01	0,0001

Nota. La tabla presenta los valores de variación dados en la medición de opacidad.

Figura 77.

Comparación de valores obtenidos



Nota. El gráfico representa la variación existente en medición de opacidad con y sin presencia de hidrógeno en la admisión en un MEC.

La gráfica muestra la opacidad que se presenta en las dos pruebas realizadas con y sin presencia de hidrógeno, de esta manera se puede ver la variación que existe cuando se tiene activado el generador de hidrógeno, se observa una variabilidad máxima de 0,51 % de opacidad en las diez pruebas realizadas, cinco sin la presencia de hidrógeno y cinco con el generador de hidrógeno encendido.

Capítulo V

Conclusiones Y Recomendaciones

Conclusiones

- Se concluye que el sistema de inyección BI-FUEL y DUAL - FUAL de hidrógeno ha incidido en la reducción de hidrocarburos en los gases de escape en los motores de encendido provocado, dando como resultado una baja emanación de partículas de combustible.
- Mediante la fundamentación teórica se pudo conocer aspectos importantes sobre la generación de hidrógeno por electrólisis del agua en oxihidrógeno, que posteriormente servirán como fuente de aplicación para la investigación, que mediante la construcción de un reactor de hidrógeno se pudo evidenciar la reducción de sustancias nocivas por la salida de escape de los vehículos de prueba.
- Al ejecutar las mediciones de opacidad mediante la normativa nacional e internacional se identificó los requisitos, parámetros, protocolos y procedimientos para las mediciones de gases de escape y opacidad en MEP y MEC respectivamente. Concluyendo que mediante las tablas y gráficas estadísticas se presencié la variación de los gases de escape en comparativa con la presencia del hidrógeno como mejorador de combustión en los motores MEP y MEC.
- Mediante el análisis de gases continuos se determinó que los valores obtenidos en un régimen de revolución de 650 RPM y una temperatura de 91°C en el MEP son de monóxido de carbono corregido (CO_{corr}) de 0,04 %Vol., LAMBDA 1,008 monóxido de carbono (CO) de 0,04 %Vol., dióxido de carbono (CO₂) de 15,2 %Vol., hidrocarburos (HC) de 71 ppmVol, oxígeno (O₂) de 0,27 %Vol. y óxidos de nitrógeno (NO) de 0 ppmVol, cuando no se tiene la presencia de hidrógeno en la admisión de dicho motor sin mostrar una variación en los gases de escape tabulados idénticamente en las 5 pruebas.

- En consecuencia de la obtención de estos del análisis de gases continuos se señaló que los valores obtenidos en un régimen de revolución de 660 RPM y una temperatura de 91°C en el MEP son de monóxido de carbono corregido (COcorr) de 0,29 %Vol., LAMBDA 1,025 monóxido de carbono (CO) de 0,29 %Vol., dióxido de carbono (CO₂) de 14,6 %Vol., hidrocarburos no combustionados (HC) de 162 ppmVol, oxígeno (O₂) de 0,85 %Vol. y óxidos de nitrógeno (NO) de 26 ppmVol, cuando se tiene activado el generador de hidrógeno en la admisión del motor presentando como dato el monóxido de carbono corregido en esta prueba.
- En el caso del análisis de gases oficial en un régimen de motor en ralentí de 690 RPM y una temperatura de motor de 89 °C se extrajo valores de monóxido de carbono (CO) de 0,29 %Vol., dióxido de carbono (CO₂) de 14, %Vol., oxígeno (O₂) de 1,2 %Vol., hidrocarburos no combustionados (HC) de 148 ppmVol, y un LAMBDA de 1,043, con el MEP en prueba al mínimo dando un incremento de hidrocarburos no combustionados de 120 ppmVol de los 28 ppmVol obtenidos sin el hidrógeno en régimen de ralentí.
- Como resultado del análisis de gases oficial en un régimen de motor de 2520 RPM y una temperatura de motor de 89 °C se extrajo valores de monóxido de carbono (CO) de 0,61 %Vol., dióxido de carbono (CO₂) de 14,3 %Vol., oxígeno (O₂) de 0,66 %Vol., hidrocarburos no combustionados (HC) de 143 ppmVol, y un LAMBDA de 1,007, con el MEP en prueba en aceleración, con presencia de hidrógeno, dando valores inferiores de hidrocarburos no combustionados del 14.5% referente a la misma prueba sin hidrógeno.

Recomendaciones

- La falla más común existente al momento de realizar un correcto análisis de gases es el de no percatarse del estado del filtro de la sonda que ingresa al tubo de escape, su limpieza es fundamental al momento de querer adquirir los datos de una manera precisa.
- Al momento que el analizador de gases está realizando un auto cero o no se está ocupando la sonda, el equipo debe estar a una distancia de 4 metros del tubo de escape para no alterar la próxima lectura.
- Es necesario el estudio de protocolos y tener el conocimiento previo de los valores de medición que se encuentran dentro del rango normal de funcionamiento para análisis de gases y medición de opacidad.
- Al momento de conectar los accesorios del analizador de gases, se debe tener precaución que los cables de los sensores de régimen y temperatura del motor no queden comprometidos con partes móviles del vehículo.
- Para la medición de opacidad tener en cuenta que al vehículo se lo lleva a un régimen de revolución gobernada, así que entre cada prueba dejar reposar el automotor por un periodo mínimo de 15 minutos.
- Para un uso adecuado del equipo de medición de opacidad, se recomienda que, entre cada test, se realice la limpieza de la sonda puesto que el hollín tiende a impregnarse en este y se tiende a dañar el equipo.

Bibliografía

ABSOLUTENERGIES. (2016). *HHO Kit bec-1500 Dry Cell 11 Generador de platos 100% inox 316L Economía de combustible*. Amazon. <https://www.amazon.com/-/es/bec-1500-Dry-11-Generador-platos-Economía-combustible/dp/B00Z1HN2BQ>

Aguer Hortal, M., & Miranda Barreras, Á. L. (2007). *EL HIDRÓGENO Fundamento de un futuro equilibrado*. Ediciones Díaz de Santos, S. A.

Brain Bee Workshop Solutions. (n.d.-a). *BRAIN BEE — AGS-688*. Mahle. <https://www.brainbee.mahle.com/brainbee/es/product-lines/emission/ags-688/>

Brain Bee Workshop Solutions. (n.d.-b). *BRAIN BEE — MGT-300 EVO*. Mahle. <https://www.brainbee.mahle.com/brainbee/es/product-lines/emission/mgt-300-evo/>

Brain Bee Workshop Solutions. (2014). *AGS - 688 Analizador de los gases de escape*. <https://www.brainbee.mahle.com/files/brainbee/product-lines/emission/ags-688/mahle-brain-bee-ags-688-es.pdf>

Cabrera Pérez, D., Díaz Torres, M., García Déniz, R., Hernández Rodríguez, C., Martel Rodríguez, G., Pardilla Fariña, J., Piernavieja Izquierdo, G., Subiela Ortin, V., Schallenberg Rodríguez, J. C., & Unamunzaga Falcón, P. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

Cartek. (2007). *Manual de operacion del opacimetro Cartek 57-220*. MAXIITEK S.A. <https://es.scribd.com/document/497871635/Manual-de-operacion-de-Analizador-de-gases-y-opacidad>

Fábrega Ramos, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna* [Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6533>

Fúnez Guerra, C., Almansa Rodríguez, E., & Fuentes Ferrera, D. (2010). El hidrógeno: vector energético del futuro. *Energía & Minas: Revista*, 20–27.

García Solís, J. J. (2013). *Hidrógeno Y Energías Renovables Soluciones Para Un Mañana Sustentables*. Trillas.

Gobierno de la República del Ecuador. (2022). Apenas el 0,8% de las muestras de combustibles tomadas entre los años 2020 y 2022 han presentado inconsistencias en su calidad – Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/apenas-el-08-de-las-muestras-de-combustibles-tomadas-entre-los-anos-2020-y-2022-han-presentado-inconsistentes-en-su-calidad/#:~:text=Desde el año 2020 y,de servicio%2C terminales y refinerías.>

Gutiérrez Jodra, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *V Programa de Promoción de La Cultura Científica y Tecnológica*, 99(1), 49–67.

Hernández Sobrino, F., Rodríguez Monroy, C., & Hernández Pérez, J. L. (2010). El hidrógeno: Una alternativa real a los combustibles fósiles y a los biocombustibles para automoción en España. *Dyna (Bilbao)*, 85.

Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE. (2020). Balance Energético Nacional 2020. *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables*, 26–27, 154–155. <https://n9.cl/djs29>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2002). NTE INEN 2207. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites Permitidos de Emisiones Producidas por Fuentes Móviles Terrestres de Diesel. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2207.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2003). NTE INEN 2349. *Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2349.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013a). NTE INEN 2202. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de Motores de Diesel Mediante la Prueba Estática. Metodo de Aceleración Libre.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013b). *NTE INEN 2203. Medición de Emisiones de Gases de Escape en Motores de Combustion Interna.*
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2202-1.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2017). NTE INEN 2204. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites Permitidos de Emisiones Producidas por Fuentes Móviles Terrestres que Emplean Gasolina. (Issue 2).
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2204-2.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2021). *Anuario de Estadísticas de Transporte 2020.* 1–39. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica de Transporte/2020/2020_ANET_PPT.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica_de_Transporte/2020/2020_ANET_PPT.pdf)

Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía* (Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI & Universidad Pontificia Comillas (eds.)).

Llorca, J. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético. PubliCEP, S.L.

Morlanés Sánchez, N. (2008). Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua. Universidad Politécnica de Valencia.

Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). Motores de Combustión Interna Alternativos. Parte 2. Reverté, S.A.

SAE International. (1996). SAE J1667. Snap - Acceleration Smoke Test Procedure for Heavy - Duty Diesel Powered Vehicles.
https://www.nj.gov/dep/bmvim/bmvim_saej_1667.pdf

Telenchana Cuspa, E. F. (2018). Diseño y construcción de un reactor de obtener hidrógeno para utilizarlo como combustible en un motor de combustión interna Suzuki de 75 cm³. [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga].

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14155>

Anexos