



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno.

Pazmiño Dávila, Kevin Orlando y Peralvo Mesías, Antonio Fabricio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

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

Ing. Quiroz Erazo, José Lizandro MsC.

15 de noviembre de 2022

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	675
Words with Minor Changes	409
Paraphrased Words	505
Omitted Words	0

Ing. Quiroz Erazo, José Lizandro

C.C: 0502312796

Certificación



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno" fue realizado por los señores Pazmiño Dávila, Kevin Orlando y Peralvo Mesías, Antonio Fabricio; 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 analizado 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, 15 de noviembre de 2022

Ing. Quiroz Erazo, José Lizandro

C.C.:0502312796



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Pazmiño Dávila, Kevin Orlando** y **Peralvo Mesias, Antonio Fabricio**, con cédulas de ciudadanía n° 1718986852, 0504318882, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno**, 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, 15 de noviembre de 2022

Pazmiño Dávila, Kevin Orlando

C.C.: 1718986852

Peralvo Mesias, Antonio Fabricio

C.C.: 0504318882



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de Publicación

Nosotros, **Pazmiño Dávila, Kevin Orlando** y **Peralvo Mesías, Antonio Fabricio**, con cédulas de ciudadanía n° 1718986852, 0504318882 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 15 de noviembre de 2022

Pazmiño Dávila, Kevin Orlando

C.C.: 1718986852

Peralvo Mesías, Antonio Fabricio

C.C.: 0504318882

Dedicatoria

“Pon en manos de Dios todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán”.

Proverbios 16:3

Primero dedico este proyecto y esta etapa de mi vida a Dios y a mis santos: a mi Santa Madre la Virgen del Cisne, al Divino Niño de Isinliví, a mi protector San Benito y mi Patrona Santa Rosa.

A mis padres Orlando y Janeth, quienes me han dado su apoyo incondicional, por su amor, por su motivación. Por ser una guía para formarme como hombre de bien, de principios y valores, por ser mi inspiración y la fuerza que siempre he necesitado para no rendirme.

A mi hermano Daniel, con quien compartimos la ideología que nuestra familia, siempre debe permanecer unida en las buenas y malas, que la vida nos permita estar siempre unidos a pesar de la distancia.

A mis seres queridos que han fallecido; no podrán estar físicamente conmigo, pero los llevo siempre en mi corazón, especialmente a mi abuelo Luis Aníbal, mi amigo de fútbol.

Finalmente, a mis compañeros de aula, de deporte, de música y danza con quienes he vivido gratas experiencias; siempre hay algo que aprender para la persona que esté dispuesta a aceptar retos y nuevas experiencias.

Kevin Orlando

Dedicatoria

Este proyecto lo dedico a Dios por concederme la vida, por todas las bendiciones recibidas durante mi carrera universitaria, la sabiduría y fortaleza para poder enfrentar todas las adversidades que se han presentado.

A mis padres por el apoyo incondicional, la motivación constante y por fomentar en mí los valores de la humildad y la sencillez, además de ser ejemplo de sacrificio y superación.

A mi familia y amigos por la confianza, estima y los momentos vividos durante esta etapa de mi vida.

Antonio Fabricio

Agradecimiento

“La gratitud es el reflejo del recuerdo que se guarda en el corazón y en la mente”

Louise Hay.

A Dios y a mi Santa Madre la Virgen del Cisne por darme vida y salud, por haberme dado esta hermosa familia que son mi motor para seguir adelante y concluir en esta etapa de mi vida, mi formación profesional como Ingeniero Automotriz.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, por abrirme las puertas de la formación académica, por formarme como un profesional con altas cualidades competitivas y encaminar mi vida hacia el éxito.

A mis padres Orlando y Janeth, porque ellos son los precursores de mi profesión.

A mi hermano Daniel por ser compañía, amistad y apoyo, en las buenas y en las malas hemos estado y estaremos juntos como grandes amigos.

Kevin Orlando

Agradecimiento

A Dios por la vida, la salud y por permitirme concluir con éxitos la carrera de Ingeniería Automotriz; A mis padres por ser el pilar fundamental para poder culminar esta etapa y poder cumplir este anhelado sueño, por el amor, sacrificio diario y el tiempo invertido durante mis estudios.

A mis hermanos por estar junto a mí durante mi vida y compartir el deseo de cumplir este inmenso sueño, por caminar siempre de la mano y apoyarme incondicionalmente durante este arduo camino.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L y a sus docentes por todos los conocimientos impartidos en el ámbito profesional y principalmente por haber inculcado en mí la verdadera esencia de ser humano

A mi familia, amigos y compañeros que fueron apoyo y soporte durante esta etapa, por todos los momentos compartidos y las vivencias que han sido motivación para culminar esta carrera.

Antonio Fabricio

Tabla de Contenidos

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de Figuras	16
Índice de Tablas	19
Índice de Ecuaciones.....	21
Resumen.....	22
Abstract	23
Capítulo I: Planteamiento del Problema de Investigación	24
Antecedentes	24
Planteamiento del problema	26
<i>Nota.</i>	26
Descripción Resumida	27
Justificación e Importancia	28

Objetivos	29
<i>Objetivo General</i>	29
<i>Objetivos Específicos</i>	29
Metas	29
Hipótesis	30
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	30
<i>Variable Independiente</i>	30
<i>Variable Dependiente</i>	30
Capítulo II: Marco Teórico	32
Motores de Combustión interna	32
<i>Motor de Combustión Interna Alternativos (MCIA)</i>	33
Motores de Combustión Interna de Encendido Provocado (MEP).....	35
Motores de 4 tiempos.	36
<i>Admisión</i>	36
<i>Compresión</i>	36
<i>Trabajo</i>	37
<i>Escape</i>	38
Combustibles	39
<i>Gasolina</i>	41
Octanaje.	42
<i>Combustión de la gasolina</i>	42
Mezcla de gasolina por inyector.	43
Mezcla de gasolina por carburador.	44

<i>Hidrógeno</i>	45
Poder calorífico.....	45
<i>Oxihidrógeno HHO</i>	46
Electrolisis.....	47
<i>Celdas Electroquímicas</i>	47
<i>Celdas voltaicas o galvánicas</i>	49
<i>Celdas electrolíticas</i>	50
<i>Celda Electrolítica Húmeda</i>	50
<i>Celda Electrolítica Seca</i>	51
Combustión de un Motor a Gasolina + Oxihidrógeno	51
Gases producidos por un motor a gasolina	52
<i>Monóxido de carbono</i>	52
<i>Hidrocarburos</i>	52
<i>Óxido de nitrógeno</i>	53
Partículas de Carbón en el Motor	53
<i>Hollín</i>	55
<i>Nucleación</i>	55
<i>Crecimiento de una Partícula Primaria de Hollín</i>	56
Límites de Emisiones Gaseosas Permitidas en el Ecuador.....	57
Descarbonización de motores	58
<i>Uso del HHO para descarbonización de MCI</i>	58

Capítulo III: Diseño y Construcción del Descarbonizador	61
Introducción	61
Método de Evaluación de Soluciones	61
Casa de la Calidad	67
<i>Análisis de la casa de la calidad</i>	<i>71</i>
Diseño y construcción del equipo descarbonizador	71
<i>Cantidad de hidrógeno requerida por cilindrada del motor</i>	<i>73</i>
<i>Número de electrodos necesarios.</i>	<i>74</i>
Cantidad de carga necesaria para la electrólisis.	74
Producción de Hidrógeno.	75
<i>Volumen del Hidrógeno generado.</i>	<i>76</i>
<i>Caudal de Hidrógeno generado.....</i>	<i>77</i>
Celdas secas.....	78
Electrodos Polarizados.	79
Electrodos Neutros.....	80
Material de los Electrodos.....	80
Láminas Aislantes.	84
Material de las Láminas Aislantes.	85
Ensamblaje de la celda seca.....	86
Módulo Electrolito	87
Electrolito.....	88

<i>Selección del Electrolito</i>	89
Materiales y ensamblaje del módulo electrolito.	89
<i>Módulo eléctrico</i>	91
PWM DC 9-60V 20A Max.	91
<i>Potencia consumida</i>	93
<i>Energía consumida</i>	93
<i>Módulo electrónico</i>	94
Sensor YF- S201.....	96
Protocolos para la ejecución de la descarbonización con HHO en un MEP.....	101
Capítulo IV: Pruebas, Análisis y Resultados.....	104
Equipos de prueba.....	105
<i>Videoscopio Automotriz</i>	105
<i>Analizador de gases</i>	105
<i>Compresómetro</i>	106
<i>Multímetro automotriz</i>	107
<i>Prueba de generación de hidrógeno</i>	108
<i>Inspección visual de la cámara de combustión</i>	108
Resultados en las pruebas de emisiones de gases de escape.	111
<i>Resultados en el vehículo Great Wall H5 2.0L</i>	111
<i>Resultados en el vehículo Chevrolet LUV 2.3L</i>	115
<i>Comparativa de emisiones en el vehículo Great Wall H5 2.0L</i>	119
<i>Comparativa de emisiones en el vehículo Chevrolet LUV 2.3L</i>	120

Prueba de compresión	121
<i>Procedimiento para medir la presión de compresión.....</i>	<i>122</i>
<i>Medición de la presión de compresión del motor del Great Wall H5 2.0L.....</i>	<i>123</i>
<i>Medición de la presión de compresión del motor del Chevrolet LUV 2.3L</i>	<i>124</i>
Prueba de consumo de combustible.....	124
<i>Resultados de la prueba de consumo de combustible.....</i>	<i>125</i>
Capítulo V: Marco Administrativo.....	127
Recursos Humanos	127
Recursos Tecnológicos.....	128
Recursos Materiales	128
Presupuesto	130
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	132
Conclusiones	132
Recomendaciones	133
Bibliografía	135
Anexos.....	140

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Árbol de Problemas</i>	26
Figura 2. <i>Clasificación de los Motores</i>	32
Figura 3. <i>Esquema General de los Motores de Combustión Interna</i>	33
Figura 4. <i>Esquema de un Motor de Combustión Interna a Gasolina</i>	36
Figura 5. <i>Movimiento de Trabajo del Motor a Gasolina de Cuatro Tiempos</i>	38
Figura 6. <i>Clasificación de los Combustibles Utilizables en un MCI</i>	40
Figura 7. <i>Sistema de alimentación de combustible por inyector y sus partes.</i>	43
Figura 8. <i>Sistema de alimentación de combustible por carburador y sus partes</i>	44
Figura 9. <i>Esquema general de la celda electroquímica</i>	48
Figura 10. <i>Esquema de una celda electrolítica húmeda</i>	50
Figura 11. <i>Esquema de una celda electrolítica seca</i>	51
Figura 12. <i>Esquema de formación y emisión de partículas</i>	54
Figura 13. <i>Esquema de los procesos de formación de hollín</i>	55
Figura 14. <i>Partículas de carbón acumuladas en la cámara de combustión de un MCI</i>	59
Figura 15. <i>Etapas de la descarbonización de los MCI</i>	59
Figura 16. <i>Casa de la calidad</i>	70
Figura 17. <i>Equipo descarbonizador de MCI</i>	71
Figura 18. <i>Módulos que conforman el equipo descarbonizador de MCI</i>	72
Figura 19. <i>Electrodos de Celdas secas.</i>	79
Figura 20. <i>Electrodo polarizado de la celda seca.</i>	80

Figura 21. <i>Electrodo neutro del generador de HHO</i>	80
Figura 22. <i>Lamina aislante interna.</i>	84
Figura 23. <i>Lámina Aislante Externa</i>	84
Figura 24. <i>Ensamblaje de las celdas secas</i>	86
Figura 25. <i>Esquema del módulo del electrolito</i>	87
Figura 26. <i>Hidróxido de potasio en forma de escamas</i>	89
Figura 27. <i>Módulo electrolito ensamblado</i>	90
Figura 28. <i>Esquema del módulo eléctrico</i>	91
Figura 29. <i>Esquema de la PWM DC 9-60V 20A Max</i>	92
Figura 30. <i>Panel de control del equipo descarbonizador</i>	94
Figura 31. <i>Esquema del panel de control</i>	95
Figura 32. <i>Esquema de funcionamiento del módulo electrónico</i>	96
Figura 33. <i>Sensor YF-S201</i>	97
Figura 34. <i>Esquema de conexión del sensor YF-S201</i>	97
Figura 35. <i>Vehículo Great Wall H5 2.0 L, año 2015</i>	104
Figura 36. <i>Videoscopio Automotriz para sistemas Android</i>	105
Figura 37. <i>Analizador de gases Neomotec CG450</i>	106
Figura 38. <i>Medidor de compresión de cilindros del motor</i>	106
Figura 39. <i>Multímetro Automotriz o tester eléctrico</i>	107
Figura 40. <i>Prueba de la generación del HHO</i>	108
Figura 41. <i>Cámara de combustión antes de la descarbonización Great Wall H5</i>	109

Figura 42. <i>Cámara de combustión de la Chevrolet LUV antes de la descarbonización</i>	109
Figura 43. <i>Cámara de combustión después de la descarbonización Great Wall H5</i>	110
Figura 44. <i>Cámara de combustión de la LUV después de la descarbonización</i>	110
Figura 45. <i>Comportamiento del CO en la descarbonización</i>	112
Figura 46. <i>Emisiones de HC del Great Wall H5 durante la descarbonización</i>	112
Figura 47. <i>Comportamiento de las emisiones de CO₂ del vehículo Great Wall H5</i>	113
Figura 48. <i>Emisiones de O₂ del vehículo Great Wall H5 en la descarbonización</i>	114
Figura 49. <i>Comportamiento de la relación Lambda durante la descarbonización</i>	114
Figura 50. <i>Variación del Factor AFR durante el proceso de descarbonización</i>	115
Figura 51. <i>Comportamiento del CO en la descarbonización de la Chevrolet LUV</i>	116
Figura 52. <i>Emisiones de los HC [ppm] – Tiempo [minutos] de la Chevrolet LUV</i>	117
Figura 53. <i>Comportamiento de las emisiones de CO₂ en la camioneta Chevrolet LUV</i>	117
Figura 54. <i>Resultado de las pruebas de emisiones de escape del O₂ Chevrolet LUV</i>	118
Figura 55. <i>Valores del factor Lambda en la descarbonización en la Chevrolet LUV</i>	118
Figura 56. <i>Variación del Factor AFR durante el proceso de descarbonización</i>	119
Figura 57. <i>Toma de la presión de compresión del motor del Great Wall H5</i>	122
Figura 58. <i>Ruta para la prueba de consumo de combustible</i>	125

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Parámetros característicos de los motores a gasolina para la investigación</i>	31
Tabla 2. <i>Componentes del motor de combustión interna alternativo</i>	34
Tabla 3. <i>Procesos termodinámicos que componen un ciclo en un MCI</i>	35
Tabla 4. <i>Ciclos de trabajo en un motor de 4 tiempos a gasolina</i>	39
Tabla 5. <i>Características de la gasolina.</i>	41
Tabla 6. <i>Temperatura de encendido de los combustibles</i>	42
Tabla 7. <i>Poder calorífico de combustibles.</i>	45
Tabla 8. <i>Temperaturas de auto ignición de los combustibles</i>	46
Tabla 9. <i>Componentes de la celda electroquímica</i>	48
Tabla 10. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos con motor de ciclo Otto</i> ...	57
Tabla 11. <i>Evaluación de los pesos específicos según los criterios</i>	63
Tabla 12. <i>Evaluación del criterio precio medurado</i>	63
Tabla 13. <i>Evaluación del criterio mantenimiento</i>	64
Tabla 14. <i>Evaluación del criterio regulación</i>	64
Tabla 15. <i>Evaluación del criterio temporizador</i>	65
Tabla 16. <i>Evaluación del criterio amperímetro</i>	65
Tabla 17. <i>Evaluación del criterio de tiempo de trabajo</i>	66
Tabla 18. <i>Evaluación del criterio fácil operación</i>	66
Tabla 19. <i>Cálculo de las conclusiones</i>	67
Tabla 20. <i>Requerimientos del Técnico</i>	68

Tabla 21. <i>Especificaciones técnicas del sistema</i>	69
Tabla 22. <i>Relación entre Qué y Cómo.</i>	69
Tabla 23. <i>Caudal Volumétrico de HHO recomendado en base al cilindraje del motor.</i>	73
Tabla 24. <i>Propiedades de los materiales propuestos para la construcción de la celda seca</i>	81
Tabla 25. <i>Selección del Acero para la Construcción de los Electroodos.</i>	82
Tabla 26. <i>Materiales y Dimensiones de las Planchas de Acero Inoxidable</i>	83
Tabla 27. <i>Materiales para diseñar Láminas Aislantes.</i>	85
Tabla 28. <i>Electrolitos disponibles en el mercado nacional</i>	88
Tabla 29. <i>Selección de materiales para el módulo electrolito.</i>	90
Tabla 30. <i>Selección de los materiales para el módulo eléctrico</i>	92
Tabla 31. <i>Características eléctricas de la celda seca.</i>	93
Tabla 32. <i>Especificaciones técnicas de los componentes del descarbonizador.</i>	98
Tabla 33. <i>Componentes electrónicos con sus pines y su tipo de comunicación.</i>	98
Tabla 34. <i>Funcionamiento del panel de control.</i>	99
Tabla 35. <i>Valores de la prueba de gases de escape en el vehículo Great Wall H5</i>	111
Tabla 36. <i>Emisiones de gases en la descarbonización en la camioneta Chevrolet LUV.</i>	115
Tabla 37. <i>Comparativa de emisiones de gases antes y después en la Great Wall H5.</i>	120
Tabla 38. <i>Comparativa de emisiones de escape antes y después en la Chevrolet LUV.</i>	121
Tabla 39. <i>Valores de medición de la presión de compresión del GreatWall H5.</i>	123
Tabla 40. <i>Valores de medición de la presión de compresión del Chevrolet LUV.</i>	124
Tabla 41. <i>Datos de las pruebas de consumo de combustible</i>	126

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. <i>Relación de compresión</i>	37
Ecuación 2. <i>Trabajo de un Motor</i>	37
Ecuación 3. <i>Potencia de un Motor</i>	38
Ecuación 4. <i>Reacción del electrodo cátodo</i>	74
Ecuación 5. <i>Cálculo de carga eléctrica del circuito de celdas secas</i>	75
Ecuación 6. <i>Cálculo de la masa generada de hidrógeno</i>	76
Ecuación 7. <i>Cálculo del volumen del hidrógeno diatómico</i>	76
Ecuación 8. <i>Cálculo del caudal de hidrógeno diatómico</i>	77
Ecuación 9. <i>Número de electrodos requeridos</i>	78
Ecuación 11. <i>Cálculo de la potencia de la celda seca</i>	93
Ecuación 12. <i>Cálculo de la energía consumida por hora</i>	94

Resumen

El análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno determinó que al inyectar de HHO, sea este con un sistema de alimentación de combustible por inyector o por carburador, comienza a desprender partículas de carbón acumuladas en el interior de la cámara de combustión que se pudo evidenciar a través de equipos y herramientas que han servido para tomar y comparar resultados antes, durante y después del proceso de descarbonización del motor, equipos como lo son el videoscopio automotriz que permitió la visualización de la cantidad de carbonilla acumulada en la cámara de combustión, compresómetro y el analizador de gases de combustión automotriz que mide las partículas de CO, HC, CO₂, O₂, LAMBDA y AFR. Además, se analizó los valores obtenidos con los permisibles establecidos por la normativa por la norma NTE INEN 2204 Gestión Ambiental que se encuentra vigente en el país y finalmente la prueba de consumo de combustible de acuerdo al protocolo WLTP. Es así que el uso de HHO como mantenimiento preventivo, elimina la carbonilla del motor, permite una combustión más eficiente reduciendo las PPM de gases nocivos y aumenta la compresión del motor.

Palabras clave: HHO, Carbonilla, Emisiones de gases contaminantes automotrices, eficiencia de los motores de combustión interna a gasolina.

Abstract

The analysis of the behavior of the gasoline internal combustion engine in the decarbonization process in the combustion chamber using oxyhydrogen generator equipment determined that when HHO is injected, either with an injector or carburetor fuel supply system, it begins to release carbon particles accumulated inside the combustion chamber. determined that when injecting HHO, either with a fuel supply system by injector or carburetor, it begins to release carbon particles accumulated inside the combustion chamber, which could be evidenced through equipment and tools that have been used to take and compare results before, during and after the decarbonization process of the engine, during and after the engine decarbonization process, equipment such as the automotive videoscope that allowed the visualization of the amount of carbon particles accumulated in the combustion chamber, compressometer and the automotive combustion gas analyzer that measures CO, HC, CO₂, O₂, LAMDA and AFR particles. In addition to analyzing the values obtained with the permissible values established by the NTE INEN 2 204 Environmental Management standard in force in the country and finally the fuel consumption test according to the WLTP protocol. Thus, the use of HHO as preventive maintenance, eliminates engine carbon, allows a more efficient combustion reducing the PPM of harmful gases and increases the compression of the engine.

Key words: HHO, carbon, automotive pollutant gas emissions, efficiency of gasoline engines.

Capítulo I

Planteamiento del Problema de Investigación

Antecedentes

Tipanluisa et al. (2017) afirma en su investigación sobre emisiones contaminantes de un motor de gasolina funcionando a dos cotas con combustibles de dos calidades que los factores de mayor efecto significativo para el CO, son el octanaje y la altura. Se obtiene una menor emisión de CO con un valor de 0,01 %V a 700 rpm, gasolina de 87 octanos y a nivel del mar. Obteniendo una mejor combustión del motor con un combustible de 87 octanos para el vehículo utilizado en el ensayo.

También asume que las RPM y la altura inciden significativamente en la variable de respuesta de CO₂, de acuerdo a las condiciones experimentales. Con una gasolina de 92 octanos se obtiene una mejor combustión del motor a una altura de 2860 m.

El octanaje y la relación octanaje-altura evidencian un mayor efecto significativo sobre la respuesta a las emisiones HC. Con una gasolina de 92 octanos se obtiene una menor emisión de ppm de hidrocarburos no combustionados con un valor de 0,5 ppm.

El efecto significativo en la emisión de O₂ son las revoluciones por minuto del motor y la interrelación rpm-altura. A mayor rpm y 2860 m de altura se obtiene menor emisión de O₂, con un valor de 0,51 %V.

Iñiguez Izquierdo et al. (2017) afirma en su investigación sobre el estudio de emisiones contaminantes producidas por un motor Otto con el uso de gasolina y un combustible a base de 95% de gasolina y 5% de etanol que en pruebas dinámicas, en el CO hay una reducción del 100% con el uso de combustible E5, en los HC existe una reducción del 65% con el uso del combustible E5 comparado con la gasolina común, en los CO₂ existe una reducción de 1% con el combustible E5, mientras tanto en pruebas estáticas tenemos: en CO una reducción del 31%

con el combustible E5, en los HC una reducción del 71% con el combustible E5, pero en los CO₂ se obtiene un incremento del 0,5% con el combustible E5.

El valor de incremento de los CO₂ en pruebas estáticas no es significativo, por tanto, se puede determinar que el combustible E5 es menos contaminante que la gasolina común comercializada en Ecuador, la reducción de emisiones contaminantes se debe a que, al tener un alcohol en su mezcla, los carbonos de su cadena química molecular se reducen, por lo tanto, las emisiones tienden a bajar.

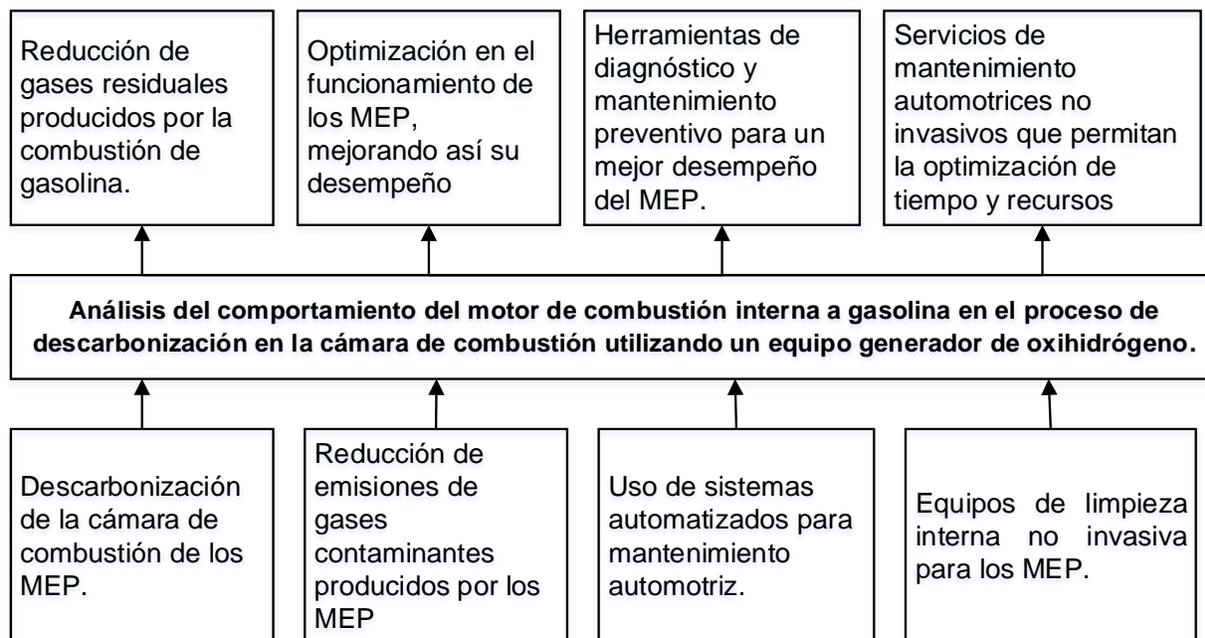
Díaz Rey et al. (2018) afirma en su investigación sobre el análisis de un generador de *HHO* de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna en la prueba de gases se observaron mejoras importantes, indicando altos beneficios de la mezcla de gas *HHO* - gasolina para el proceso de combustión, en comparación a la combustión solo con la gasolina. Estos resultados fueron: una disminución en las emisiones de monóxido de carbono (CO) del 13% al 18%, el cual es un gas tóxico y muy contaminante. Para el dióxido de carbono (CO₂) se apreció un incremento que del 5% al 9% con gas *HHO*, mostrando una mejora en la quema del combustible. Las emisiones de oxígeno (O₂) disminuyeron en un 20%, indicando que el gas *HHO* ha enriquecido la mezcla en la cámara de combustión, aprovechando más oxígeno para su combustión. Por último, se observó la reducción en las ppm de los hidrocarburos (HC) entre un 30% a un 54%, resultado de que se enriquece la mezcla y se quema más combustible. Los hidrocarburos sin quemar reducen su cantidad al salir por el tubo de escape cuando se utiliza el gas *HHO*. En general, las ventajas de la utilización de este gas en la combustión para la disminución de emisiones nocivas son apreciables.

Se obtuvo una disminución en el valor del consumo específico de combustible, SFC, de 7.3 % al ser adicionado a la mezcla gas *HHO*, haciendo un análisis a 5000, 6000 y 7000 RPM, lo que corrobora que este sistema disminuye el SFC.

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de Problemas



Nota. Diagrama árbol de problemas en el cual se detalla los problemas en la parte inferior y en los cuadros de la parte superior se enuncia una posible solución al problema suscitado.

Descripción Resumida

La presente investigación del “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA EN EL PROCESO DE DESCARBONIZACIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN UTILIZANDO UN EQUIPO GENERADOR DE OXIHIDRÓGENO.” considera los siguientes aspectos:

Se reunirá información técnica, confiable y relevante que fundamente el funcionamiento de un generador de *HHO* de celdas secas, la descarbonización de la cámara de combustión de un motor a gasolina y las pruebas de rendimiento, consumo y emisiones de una manera científica, mediante la elaboración de diagramas de procesos, para realizar un trabajo adecuado, óptimo y eficiente que sea sinónimo de calidad.

Se investigará catálogos, revistas científicas y manuales con respecto a los generadores de *HHO* de celda seca, sistemas electrónicos de control de flujo de gas y análisis de pruebas que permitirá conocer las herramientas, procesos y equipos necesarios para elaborar un protocolo de acciones a tomar al momento de ejecutar el proceso de descarbonización de un MCI a gasolina.

Se diseñará una máquina generadora de oxihidrógeno (*HHO*) a partir del electrolito celdas secas, para realizar el proceso de descarbonización en motores de combustión interna a gasolina.

Se determinará el tiempo de duración y la cantidad suministrada de oxihidrógeno en la cámara de combustión en el proceso de descarbonización, aplicando el método experimental.

Como primera etapa de la fase experimental del proyecto, se evaluará el estado de la cámara de combustión del motor con respecto a los niveles de carbonilla que se encuentra acumulada por medio de un videoscopio que permitirá visualizar y evidenciar el estado en el que se encuentra.

Posteriormente, se realizará pruebas de compresión y consumo en la fase de experimentación antes y después del proceso de descarbonización para evidenciar y comparar los valores de rendimiento y analizar el comportamiento del motor después del proceso experimental.

Durante el proceso de descarbonización, se realizará pruebas de emisiones para evidenciar la expulsión de gases y residuos de carbón que se encuentran acumulados en la cámara de combustión del motor e interpretar la efectividad del oxihidrógeno (*HHO*) en el proceso de eliminación de partículas de carbón acumulados en el interior del cilindro del motor y de gases residuales producto de la combustión de la gasolina.

Justificación e Importancia

La presente investigación se enfocará en analizar el comportamiento de los motores de combustión interna a gasolina, que serán sometidos a un proceso de descarbonización por medio del electrólisis del agua que va a generar oxihidrógeno. Este gas será ingresado al motor a través del conducto de admisión de aire que conecta con la cámara de combustión de todos los cilindros del motor, esto para evidenciar el cambio que sufre el motor de combustión interna en aspectos de torque, potencia y emisiones de CO_2 , debido a que la acumulación de carbonilla en la cámara de combustión del motor y sus componentes provoca que el motor reduzca su rendimiento y de esta forma no se aproveche al máximo sus prestaciones. Al descarbonizar un motor de combustión interna permitirá un mejor aprovechamiento de rendimiento y también reducirá las emisiones de CO_2 ofreciendo un motor más eficiente y menos contaminante, además de brindar una oportunidad de reducir la contaminación producido por la mala combustión de la gasolina en motores con acumulación de carbón en la cámara de combustión, ayudando a la concientización de la población local.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno.

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un generador de *HHO* para realizar el proceso de descarbonización en un MCI a gasolina.
- Determinar los protocolos a seguir para el proceso de descarbonización en motores de combustión interna a gasolina a partir de un generador de *HHO*.
- Analizar el funcionamiento del motor mediante el uso de equipos de diagnóstico, herramientas especializadas y pruebas de emisiones de gases.
- Comparar los valores de compresión del motor antes y después del proceso de descarbonización.
- Analizar los valores de las emisiones de gases antes y después del proceso de descarbonización aplicados en el motor de combustión interna a gasolina.

Metas

- Se analizará la bibliografía recolectada para el desarrollo de la investigación, ordenándola por prioridades.
- Se diseñará el prototipo generador de oxihidrógeno de celdas secas con la finalidad de determinar las dimensiones, formas y materiales necesarios para su construcción, con la asistencia de un software CAD.

- Se construirá el generador de oxihidrógeno con los materiales diseñados en el software CAD, considerando dimensiones y materiales.
- Se aplicará el oxihidrógeno en los motores a gasolina para realizar la parte técnica de la investigación
- Se realizarán pruebas de rendimiento a los vehículos con motor a gasolina seleccionados para la investigación.
- Se elaborará un informe técnico detallado con los resultados obtenidos en la investigación.

Hipótesis

El uso de oxihidrógeno (*HHO*) para descarbonizar la cámara de combustión de los motores de combustión interna de encendido provocado garantizará una reducción de emisiones de gases contaminantes y mejorará el rendimiento y consumo en los vehículos.

Variables de la Investigación

Variable Independiente

Descarbonización de la cámara de combustión en motores a gasolina, diseñando y construyendo un generador de oxihidrógeno.

Variable Dependiente

Comportamiento de los parámetros característicos de los motores a gasolina.

Tabla 1

Parámetros característicos de los motores a gasolina para la investigación

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Parámetros característicos de los motores de combustión interna a gasolina que serán sometidos al proceso de descarbonización	Análisis experimental de un generador de <i>HHO</i> de celda seca para descarbonizar la cámara de combustión basándose en los parámetros característicos del motor.	Parámetros de variación en el rendimiento, consumo	-	Medición	Compresómetro Protocolo WLTP
		Parámetros de variación en las emisiones de gases el motor	Ppm	Medición	Analizador de gases de escape

Nota. Parámetros característicos de los motores a gasolina.

Capítulo II

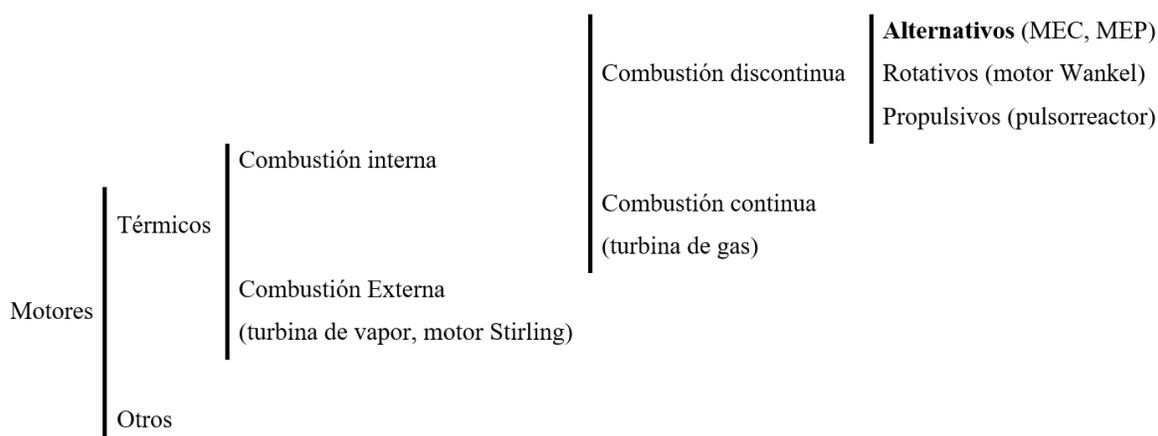
Marco Teórico

Motores de Combustión interna

En general, un motor se puede considerar como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica. Dentro de ese amplio campo, se encuentra el motor térmico, que se puede definir como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible. Se puede disponer directamente de la energía térmica, como es el caso de la radiación solar o la energía geotérmica, u obtenerla a partir de otros tipos de energía como puede ser la energía química almacenada en la materia. En este último caso se necesitará transformar esa energía química en energía térmica mediante un proceso de combustión de la materia (Payri & Desantes, 2011). En la Figura 2 se clasifican los tipos de motores térmicos de acuerdo a su proceso de combustión.

Figura 2

Clasificación de los Motores



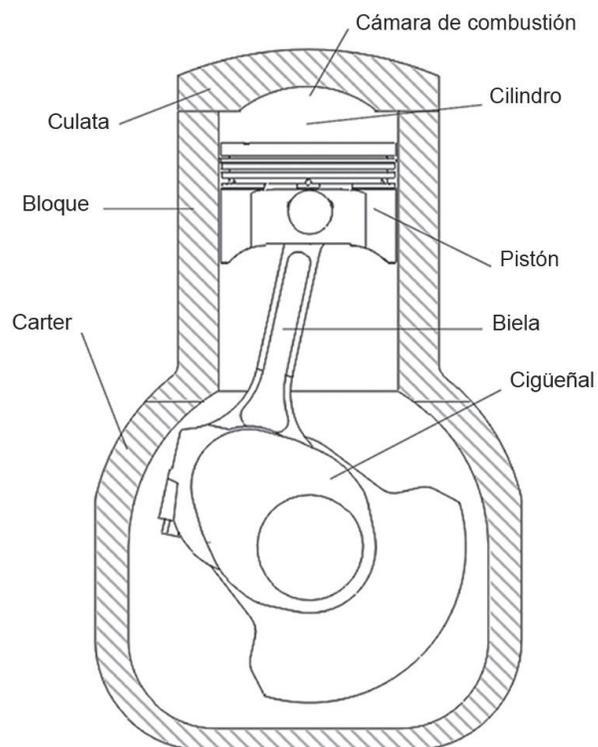
Nota. Motores de Combustión Interna Alternativos. Tomado de (Payri & Desantes, 2011).

Motor de Combustión Interna Alternativos (MCIA)

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son motores térmicos de desplazamiento volumétricos, en los que el trabajo se obtiene mediante el desplazamiento lineal del émbolo de un mecanismo biela-manivela (Rovira & Muñoz, 2015). En la Figura 3 se representa el esquema general de los motores de combustión interna, mientras que la Tabla 2 se describe las partes que lo componen.

Figura 3

Esquema General de los Motores de Combustión Interna



Nota. Motores de Combustión Interna. Tomado de (Rovira & Muñoz, 2015).

Tabla 2

Componentes del motor de combustión interna alternativo

Componente	Descripción
Pistón	Elemento con movimiento rectilíneo alternativo. Es el émbolo del mecanismo biela-manivela y aumenta o disminuye el volumen del cilindro.
Biela	Elemento que, junto con la manivela, convierte el movimiento lineal del pistón en el rotativo del cigüeñal.
Cigüeñal	Elemento rotativo del motor. En él se integra la manivela del mecanismo.
Cilindro	Es el volumen que aloja el fluido de trabajo.
Cámara de combustión	Es el volumen que queda por encima del pistón al finalizar la compresión y donde básicamente tiene lugar la combustión de la mezcla.
Culata	Elemento que constituye el cerramiento superior de los cilindros.
Bloque	Elemento que contiene los cilindros.
Cárter	Cierre inferior del motor. Contiene el aceite para la lubricación.

Nota. En la Tabla 2 se define que el motor, durante su funcionamiento, realiza una serie de procesos que se repiten periódicamente y constituyen un ciclo termodinámico abierto el cual, no puede ser cerrado al ser un motor de combustión interna. Tomado de (Rovira & Muñoz, 2015).

En la Tabla 3 se detallan los procesos que tiene un ciclo en un MCIA.

Tabla 3

Procesos termodinámicos que componen un ciclo en un MCI

Proceso	Descripción
Admisión	Proceso en el que tiene lugar la entrada del fluido de trabajo (mezcla aire-combustible, dependiendo del tipo de motor).
Compresión	Proceso fundamental para incrementar el rendimiento termodinámico del motor.
Combustión	Mecanismo de reacciones químicas globalmente muy exotérmicas mediante las cuales se genera el estado térmico del fluido de trabajo (alta presión y temperatura).
Expansión	Proceso responsable de la producción de trabajo. En él, los gases producto de la combustión se expanden y desplazan al pistón, aumentando el volumen del cilindro. La presión ejercida por los gases sobre el pistón se transforma, por equilibrio de fuerzas, en el par motor en el eje del cigüeñal.
Escape	Proceso en el que se desalojan los gases producto de la combustión para que se pueda proceder a un nuevo proceso de admisión.

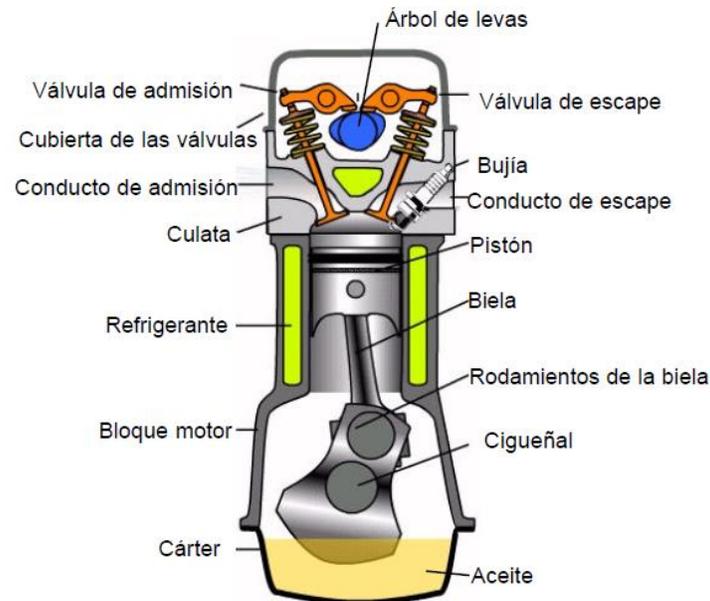
Nota. Procesos termodinámicos de los MCI. Tomado de (Rovira & Muñoz, 2015).

Motores de Combustión Interna de Encendido Provocado (MEP). La característica fundamental del MEP es que la combustión se produce mediante un aporte de energía externo al ciclo termodinámico, que se consigue al hacer saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía.

El proceso de combustión se produce por el avance de un frente de llama que recorre la cámara de combustión, partiendo desde la bujía y separando en todo momento dos zonas claramente definidas, una con gases frescos y otra con gases quemados (Payri & Desantes, 2011). En la Figura 4 se detalla en un esquema los componentes de un motor de combustión interna a gasolina.

Figura 4

Esquema de un Motor de Combustión Interna a Gasolina



Nota. Partes de un MEP. Tomado de (Auto México, 2022).

Motores de 4 tiempos. En el proceso de cuatro tiempos, el intercambio gaseoso es controlado por las correspondientes válvulas. Estas abren o cierran los conductos de admisión y de escape del cilindro:

Admisión. Al descender el pistón aumenta el volumen del cilindro y se aspira mezcla de aire/combustible fresca por la válvula de admisión abierta.

Compresión. Al subir, el pistón reduce el volumen en el cilindro y comprime la mezcla de aire/combustible. Poco antes de alcanzar el punto muerto superior (PMS), la bujía de encendido inflama la mezcla comprimida de aire/combustible e inicia así la combustión.

A partir del volumen de carrera V_h y el volumen de compresión V_c resulta la relación de compresión.

Ecuación 1

Relación de compresión

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

Donde:

- ε = Relación de compresión
- V_h = Cilindrada unitaria [cm^3]
- V_c = Volumen de la cámara de combustión [cm^3]

Según la ejecución del motor, la relación de compresión ε es de 7 a 13. Con el aumento de la relación de compresión en un motor de combustión, asciende su grado de rendimiento térmico y el combustible puede aprovecharse más eficazmente.

Trabajo. Una vez que la chispa de la bujía ha inflamado la mezcla de aire/combustible comprimida, la temperatura aumenta debido a la combustión de la mezcla. La presión en el cilindro aumenta y empuja hacia abajo el pistón. El pistón transmite el trabajo al cigüeñal a través de la biela, representando la potencia del motor disponible.

Ecuación 2

Trabajo de un Motor

$$W = F * s$$

Donde:

- W = Trabajo [Nm]
- F = Fuerza [N]
- s = Distancia [m]

Ecuación 3

Potencia de un Motor

$$P = \frac{F * s}{t}$$

Donde:

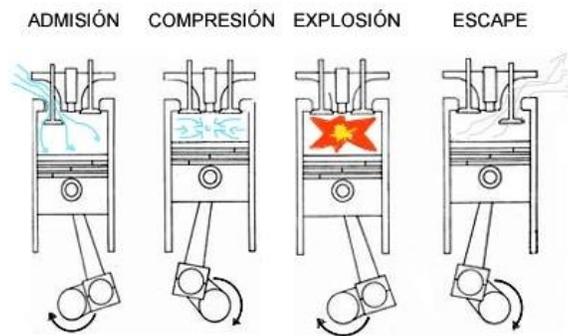
- P = Potencia [Nm/s]
- t = Tiempo [s]

La característica de potencia y de par del motor de combustión condicionan un cambio de marchas para la adaptación a las exigencias del servicio de marcha.

Escape. El pistón asciende y expulsa los gases de la combustión (gases de escape) a través de la válvula de escape abierta. Después de esto, se repite el ciclo. Los tiempos de apertura de las válvulas se superponen ligeramente con el fin de aprovechar la admisión y el escape para un mejor llenado y vaciado del cilindro. En la Figura 5 se representan los ciclos de trabajo de un MCI a gasolina, mientras que en la Tabla 4 se detallan las acciones que realizan los componentes de la cámara de combustión en cada ciclo de 4 tiempos a gasolina.

Figura 5

Movimiento de Trabajo del Motor a Gasolina de Cuatro Tiempos



Nota. Ciclos de trabajo de un MEP de 4 tiempos. Tomado de (Ortmann, 2005).

Tabla 4*Ciclos de trabajo en un motor de 4 tiempos a gasolina*

Ciclo de trabajo	Componentes de la Camara de combustión
1er tiempo Admisión	Válvula de admisión: abierta Válvula de escape: cerrada Movimiento del pistón: descendente Combustión: ninguna
2do tiempo Compresión y encendido	Válvula de admisión: cerrada Válvula de escape: cerrada Movimiento del pistón: ascendete Combustión: fase de inflamación
3er tiempo Combustión y trabajo	Válvula de admisión: cerrada, Válvula de escape: cerrada, Movimiento del pistón: descendente, Combustión: fase de combustión.
4to tiempo Escape	Válvula de admisión: cerrada, Válvula de escape: abierta, Movimiento del pistón: ascendente, Combustión: ninguna.

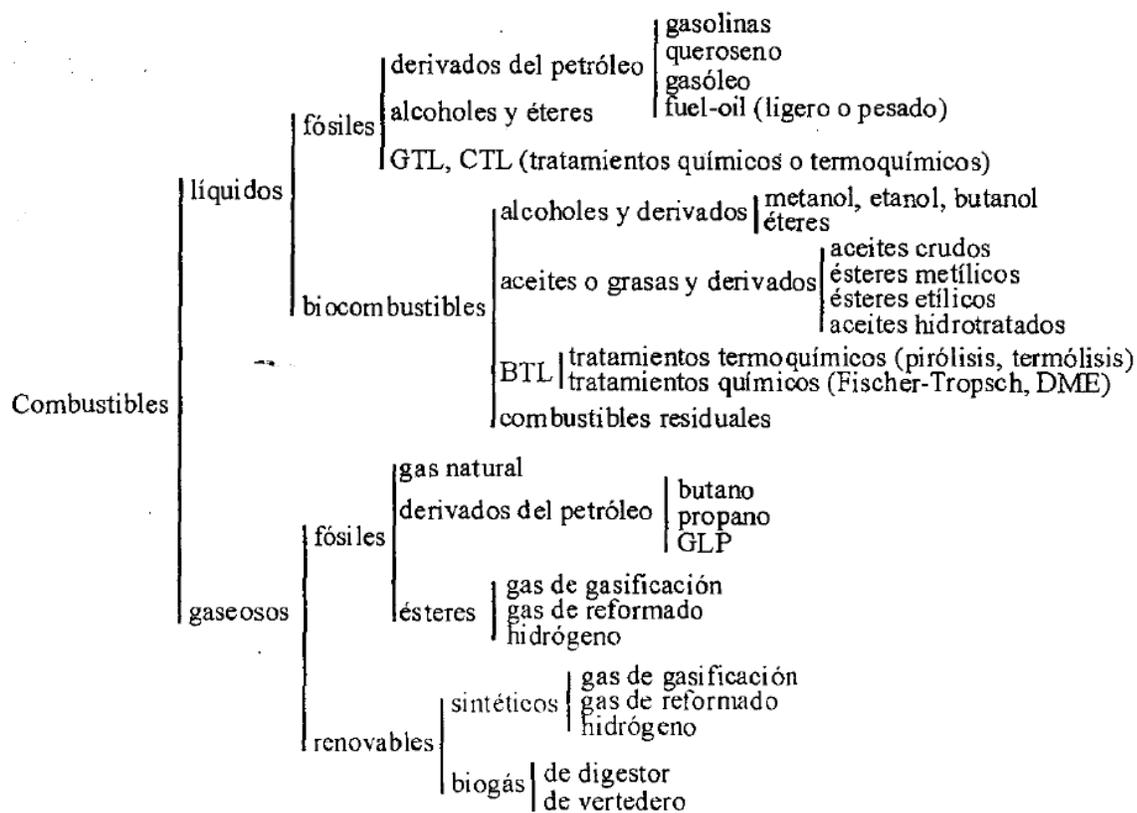
Nota. Ciclos de trabajo de un MCI de 4 tiempos. Tomado de (BOSCH, 1999).

Combustibles

Los combustibles comúnmente utilizados en motores alternativos son líquidos y proceden del petróleo, siendo por tanto de origen fósil, aunque existen otros combustibles utilizados en MCI como se observa en la Figura 6.

Figura 6

Clasificación de los Combustibles Utilizables en un MCI.



Nota. Se debe considerar que la mayoría de los combustibles actualmente utilizados en los MCI son mezclas de varios de los mostrados en la clasificación. Tomada de (Payri & Desantes, 2011).

Los combustibles líquidos tienen las ventajas de su gran densidad energética (poder calorífico), que les asegura una gran autonomía, y de su seguridad de manejo. Por el contrario, estos combustibles requieren sistemas que faciliten la evaporación y la mezcla con el aire, dado que la combustión tiene lugar en fase gaseosa.

Los combustibles gaseosos tienen la ventaja de su buena capacidad para mezclarse homogéneamente.

Gasolina

La gasolina, en los MEP constituye uno de los principales productos de las refinerías propiedad de compañías petroleras.

Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética confieren al motor una gran autonomía y a su sistema de alimentación una relativa sencillez.

Estas ventajas, junto con otras más específicas de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para su consumo en motores de combustión interna alternativos en general, y en particular para su consumo en el sector de la automoción.

Tabla 5

Características de la gasolina.

Característica	Valor	Unidad
Densidad	0,75	<i>kg/l</i>
Volatilidad	0,75	<i>kg/cm2</i>
Relación estequiométrica máxima	15,2	<i>Aire/combustible</i>
Calor latente de vaporización	376	<i>kJ/kg</i>
Auto ignición	367	<i>°C</i>
Poder calorífico inferior PCI	42.900	<i>kJ/kg</i>

Nota. Las características pueden variar dependiendo del tipo de gasolina. Tomado de (Ambientum, 2022).

Octanaje. El octanaje caracteriza la resistencia a la detonación del combustible Otto. Cuanto mayor es el octanaje, tanto más resistente a la detonación es el combustible. Internacionalmente hay dos procedimientos diferentes para determinar el octanaje: El método Research y el método Motor (DIN 51756; ASTM D 2699 y ASTM D 2700).

Tabla 6

Temperatura de encendido de los combustibles

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	130
Metano	125
Propano	105
Gasolina	87
Diésel	30

Nota. En la Tabla 6 se observa el número de octanos RON de diferentes combustibles convencionales. Tomado de (Fábrega Ramos, 2009).

Combustión de la gasolina.

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

- Combustible
- Comburente (oxígeno y combustible en proporciones adecuadas)
- Fuente de ignición

Para el proceso de combustión en el motor de gasolina, lo más favorable es una mezcla homogénea. Para ello se requiere una buena pulverización de combustible con gotitas de

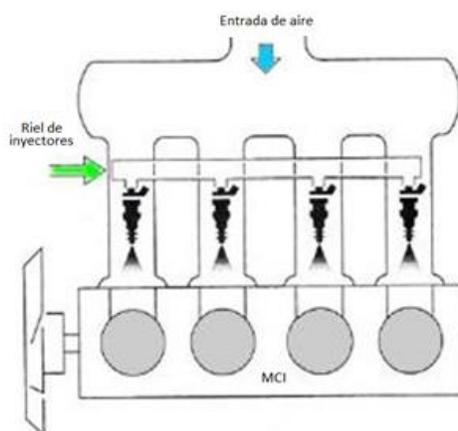
combustible lo más pequeñas posibles. Solo un chorro de inyección con buena pulverización produce una mezcla homogénea que permite un proceso de combustión favorable con una emisión reducida de hidrocarburos no quemados.

Las mezclas de aire/combustible mal preparadas muestran una emisión destacadamente mayor de hidrocarburos no quemados (partes de *HC*), ya que es más deficiente la combustión completa de la mezcla, la emisión de *HC* se incrementa, igual que la emisión de *CO*. Además, disminuye la potencia y aumenta el consumo de combustible.

Mezcla de gasolina por inyector. Estos sistemas inyectan el combustible directamente en la cámara de combustión delante de las válvulas de admisión, presentan una distribución de la mezcla especialmente uniforme. por el tubo de admisión se transporta únicamente aire, lo cual se produce con mucha uniformidad, y el sistema de inyección dosifica uniformemente el combustible a todos los cilindros como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Sistema de alimentación de combustible por inyector y sus partes.



Nota. Sistema por inyección de un MCI. Tomado de (Autonoción, 2022).

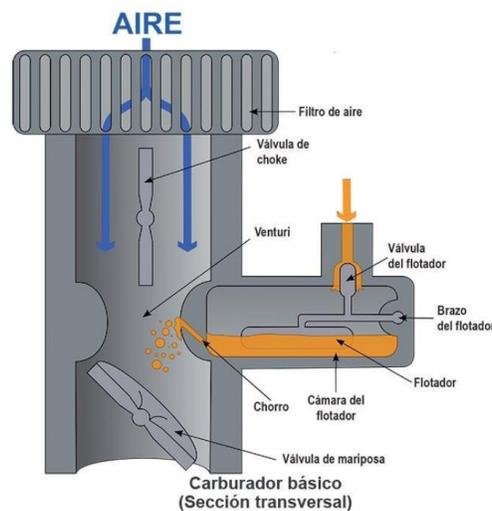
La inyección mecánica, se gestiona y regula por medio de señales de entrada-salida mecánicas (energía cinética del aire de admisión, presión de gasolina).

La inyección electrónica, trabajan con sensores, sus señales primarias son transformadas en señales eléctricas que se utilizan para el cálculo de las señales de ejecución hacia el inyector.

Mezcla de gasolina por carburador. Es la parte del motor en donde se mezclan el aire y la gasolina antes de entrar a la cámara de combustión como se observa en la Figura 8.

Figura 8

Sistema de alimentación de combustible por carburador y sus partes.



Nota. Sistema por carburador de un MCI. Tomado de (Actualidad Motor, 2022).

La mezcla estequiométrica o factor lambda en un carburador es de 14,7 partes de aire por cada parte de gasolina. Cuando hay demasiado aire y poca gasolina, el factor lambda es mayor de 1 y se considera una mezcla pobre, cuando es menor de 1 se le considera mezcla rica por exceso de gasolina en la mezcla. Los máximos y mínimos permitidos son 10:1 y 17:1.

Hidrógeno

Se ha utilizado hidrógeno por sus cualidades tales como su alto número de octano en comparación a la gasolina. Otro aspecto importante es la energía mínima requerida para la ignición, la cual es de 0.017 mJ para el hidrógeno, valor por debajo de otros combustibles como el metano (0.29 mJ) y la gasolina (0.24 mJ). Otra de las ventajas de este combustible es su velocidad de quemado (2.65 m/s y 3.25 m/s), la cual indica que el hidrógeno se quema rápidamente, es decir, su combustión tiene poca duración (Gutiérrez Jodra, 2005).

Poder calorífico. El hidrógeno tiene un poder calorífico superior a la gasolina, por lo tanto, es un combustible más eficiente en relación al volumen de gasolina que se debe utilizar para realizar el mismo trabajo dentro de la cámara de combustión (Reyes et al. 2018).

Tabla 7

Poder calorífico de combustibles.

Combustible	<i>KJ/g</i>	<i>Kcal/g</i>	<i>BTU/lb</i>
Hidrógeno	141,9	33,9	61
Gasolina	47	11,3	20
Diésel	45	10,7	19,3
Etanol	29,7	7,1	12
Propano	49,9	11,9	21
Butano	49,2	11,8	21,2
Carbón	27	7,8	14
Gas Natural	54	13	23

Nota. Poder calorífico de los combustibles en diferentes unidades. Tomado de (Revista Científica y Tecnológica UPSE, 2018).

El hidrógeno debido a sus ventajas sobre el combustible tradicional, tanto en el poder calorífico como en su octanaje, de manera agregada es un elemento poco nocivo para la salud en pequeñas cantidades y este de forma ideal no genera contaminación (Reyes et al. 2018).

La temperatura de auto ignición es mayor en comparación a otros carburantes tal como se explica en la Tabla 8.

Tabla 8

Temperaturas de auto ignición de los combustibles

Combustibles	Temperatura °C
Gasolina	250
Diésel	269,5
Hidrógeno	584,85
Metano	537
Propano	540

Nota. Auto ignición de los combustibles. Tomado de (UPSE, 2018).

Oxihidrógeno HHO

El gas oxihidrógeno es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en una relación molar 2: 1. Su proceso de combustión produce agua y 142.35 *kJ* de calor por cada gramo de hidrógeno. Dentro de sus propiedades se destacan su energía mínima de ignición, la cual está alrededor de los 0.02 *mJ*, y su inflamabilidad en condiciones de temperatura de 298 *K* y presión de 1 *atm* en aire seco va desde 4% hasta un 94% de *HHO*. Su método de obtención es mediante el proceso de electrólisis del agua (Díaz Rey et al. 2018).

Electrolisis

El proceso de electrólisis para la obtención del gas *HHO* consiste en la descomposición de las moléculas de agua (H_2O) en oxígeno (O) e hidrógeno (H_2), mediante la circulación de una corriente eléctrica en el agua. Para optimizar la producción del gas *HHO* es necesario modificar el *pH* del agua mediante un ácido o base, en este caso se utiliza hidróxido de potasio ($NaOH$), ayudando así a la velocidad de la reacción. En este caso el hidrógeno que se obtiene es de elevada pureza, comparado con otros métodos de obtención (Díaz Rey et al. 2018).

La electrólisis del agua no utiliza agua pura, ya que ésta no es un buen conductor iónico. Resulta necesario variar el *pH* del electrolito mediante la adición de un ácido o una base, de modo que aumente la concentración de protones o grupos hidroxilo, respectivamente, y la movilidad iónica sea lo suficientemente grande como para disminuir la resistencia eléctrica y no contribuir de manera apreciable al sobrepotencial. Normalmente se utiliza un medio alcalino porque el medio ácido conlleva problemas de corrosión más importantes. Las bases que se añaden acostumbran a ser hidróxido de sodio, $NaOH$ (sosa caustica), o de potasio (KOH).

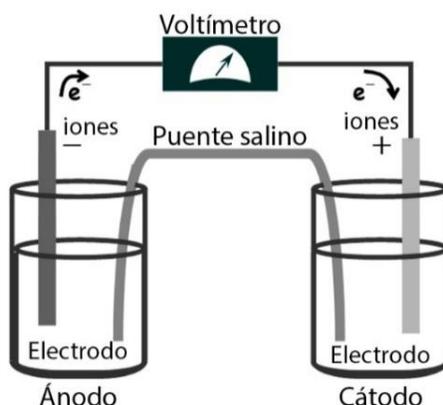
El valor de conductividad eléctrica es máximo cuando la concentración de KOH está cerca del 28%, por lo que la mayoría de los electrolizadores alcalinos contienen concentraciones del 25% al 35%. (Llorca, 2010, pág. 47).

Celdas Electroquímicas

En forma general las celdas electroquímicas son dispositivos que están formados por dos conductores o electrodos sumergidos en un medio electrolítico, unidos por un puente salino y conectado por un voltímetro que mide la cantidad de electrones en circulación. En la Figura 9 se ilustra los componentes de la celda electroquímica, mientras que en la Tabla 9 se detallan los componentes del mismo.

Figura 9

Esquema general de la celda electroquímica



Nota. Celdas electroquímicas. Tomado de (Software Transporte, 2021).

Tabla 9

Componentes de la celda electroquímica

Componente	Descripción
Electrodo positivo (Cátodo)	Aquí se dan las reacciones de oxidación y es el electrodo que se encuentra unido al polo positivo del generador.
Electrodo negativo (Ánodo)	Aquí se dan las reacciones de reducción y es el electrodo que se encuentra unido al polo negativo del generador.
Electrolito	Son sustancias (bases, ácidos o sales) que al ser disueltas en agua son conductores de la electricidad.
Puente Salino	Es un Tubo de vidrio relleno de un electrólito que impide la migración rápida de las sustancias de una celda a otra, permitiendo no obstante el contacto eléctrico entre ambas. El electrólito suele ser una disolución saturada de <i>KCl</i> retenida mediante un gel (López, 2010).

Componente	Descripción
Fuente de energía	Permite el paso de los electrones cerrando el circuito. Mide la diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo siendo la lectura el valor del voltaje de la celda.
Intensidad de corriente	Es la cantidad de carga eléctrica por unidad de tiempo que circula en un circuito, se identifica con la letra I y su unidad de medida es el Amperio (A).
Voltímetro	Se utiliza para determinar la diferencia de potencial que existe entre dos puntos de un circuito eléctrico a esto se le conoce como voltaje y su unidad de medida es el Voltio (V).

Nota. Partes de las celdas electroquímicas. Tomado de (La Guía, 2010).

Según la teoría de Arrhenius, al disolver una base un ácido o una sal, gran número de moléculas de estos cuerpos se disocian o dividen en grupos atómicos cargados eléctricamente, denominados iones. (Alonso & Acosta, 1984). Estos iones están unos cargados positivamente (Cationes) y otros cargados negativamente (Aniones).

Existen dos tipos fundamentales de celdas electroquímicas y en ambas tiene lugar la transformación de una forma de energía en otra:

Celdas voltaicas o galvánicas

Son celdas electroquímicas en las cuales la energía química liberada en forma espontánea se convierte en energía eléctrica. Por lo general, consta de dos metales diferentes conectados por un puente salino (Coro & Escobar, 2017).

Celdas electrolíticas

Son dispositivos capaces de producir reacciones químicas a través de la introducción de energía eléctrica. En esta celda se da la electrólisis, y tiene un dispositivo adicional que es la fuente de energía.

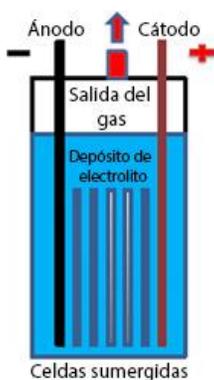
En procesos electrolíticos se usa generadores de corriente continua. Existen dos tipos de celdas electrolíticas que tienen el mismo principio de funcionamiento: celda electrolítica húmeda y seca. (Coro & Escobar, 2017).

Celda Electrolítica Húmeda

En el contenedor de la celda los electrodos están totalmente inmersos en el electrolito, los electrodos de esta celda pueden ser de diferentes formas, ya sean en espiral, tubos o placas la forma depende del tamaño del contenedor (Coro & Escobar, 2017).

Figura 10

Esquema de una celda electrolítica húmeda



Nota. Celdas húmedas y sus partes. Tomado de (Lopez, 2021).

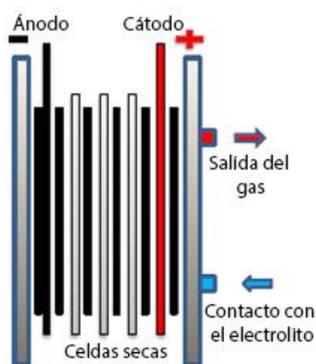
Celda Electrolítica Seca

El electrólito fluye por el interior de la celda. Los electrodos de este tipo de celdas están separados por juntas las cuales evitan que el electrólito se escape de la celda hacia las conexiones eléctricas.

A diferencia de la celda electrolítica húmeda los electrodos no están totalmente inmersas en el electrólito, tan sólo determinada área de los electrodos está en contacto, esto depende del diseño de la celda (Coro & Escobar, 2017).

Figura 11

Esquema de una celda electrolítica seca



Nota. Celdas secas y sus partes. Tomado de (Lopez, 2021).

Combustión de un Motor a Gasolina + Oxihidrógeno

Al combinarse dos tipos diferentes de combustibles se obtiene una mezcla entre ellos, como el hidrógeno es más eficiente que la gasolina convencional, se obtendrá un aumento de potencia proporcional al aporte que éste entregue al motor, especialmente en la aceleración donde se gasta más energía al romper el reposo inercial.

El hidrógeno es 0% contaminante, inodoro e incoloro y lo importante, no es tóxico. Es un elemento poco utilizado en la industria automotriz debido a su complejo almacenamiento, sin embargo, su eficiencia energética supera a los otros combustibles con relación al peso lo que la convierte en una opción atractiva (Reyes et al. 2018).

Gases producidos por un motor a gasolina

Los gases emitidos por un motor de combustión interna a gasolina son: inofensivos y contaminantes (AS S.L.U, 2022).

Monóxido de carbono

En concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores de CO al 0,3 % en volumen resultan mortales. La falta de oxígeno en la combustión hace que ésta no se produzca completamente y se forme Monóxido de Carbono en lugar de Dióxido de Carbono. En un vehículo, la aparición de mayores concentraciones en el escape de CO indica la existencia de una mezcla inicial rica o falta de oxígeno (AS S.L.U, 2022).

Hidrocarburos

Dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos. El Benceno, por ejemplo, es venenoso por sí mismo, y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel, ojos y conductos respiratorios; si el nivel es muy alto, provocará depresiones, mareos, dolores de cabeza y náuseas.

El Benceno es uno de los múltiples causantes de cáncer. Su presencia se debe a los componentes incombustibles de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de Aldehídos y Fenoles.

La presencia simultánea de Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno, rayos ultravioleta y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias muy graves para la salud de los seres vivos (AS S.L.U, 2022).

Óxido de nitrógeno

No sólo irritan la mucosa sino que en combinación con los Hidrocarburos contenidos en el smog y con la humedad del aire producen Acidos Nitrosos, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida y contaminan grandes áreas, algunas veces situadas a cientos de kilómetros del lugar de origen de la contaminación (AS S.L.U, 2022).

Partículas de Carbón en el Motor

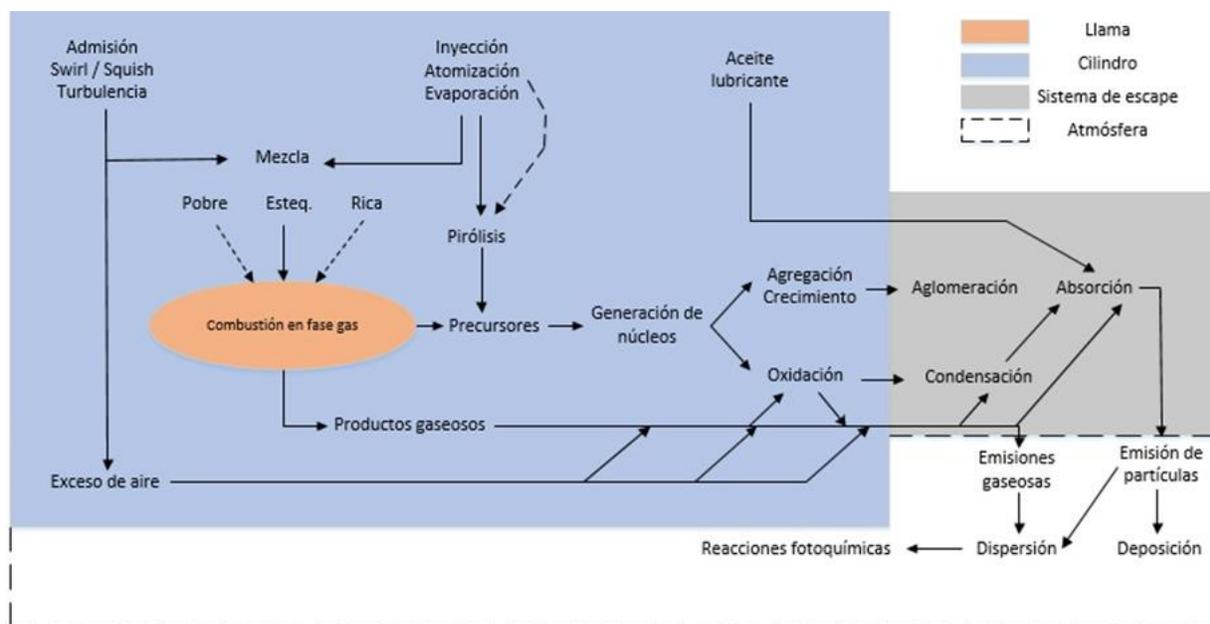
Se considera partícula a cualquier materia presente en los gases de salida que se encuentre en estado líquido o sólido en condiciones aproximadamente ambientales. La consecuencia directa de esta definición es que a la hora de analizar las emisiones de partículas es imprescindible estudiar el proceso de dilución del escape con el aire ambiente. Una característica del aerosol que aparece en el escape de los motores es su capacidad para que se produzcan cambios en las características físicas y químicas del material particulado debido a distintos procesos tales como la sedimentación, evaporación, condensación, crecimiento por colisión, depósitos en la superficie de las partículas, procesos fotoquímicos, etc.

Debido a estos procesos físicos y químicos que pueden ocurrir tanto en la línea de escape como en el momento de la dilución en la atmósfera, se considera que una determinación exacta de las emisiones de partículas requiere una simulación de estos procesos de dilución, procesos que obligan a distinguir entre partículas primarias, aquellas que se forman

directamente como el producto del proceso de combustión y se miden justo a la salida del cilindro, partículas secundarias, resultantes de alguno de los procesos atmosféricos mencionados anteriormente, tanto en el escape como ya directamente en la atmósfera, y que se recogen usualmente mediante sistemas de dilución situados al final del sistema de escape o en una derivación del mismo (Payri & Desantes, 2011). En la Figura 12, se presenta un esquema el proceso de formación las partículas de carbón en la cámara de combustión de un MCI.

Figura 12

Esquema de formación y emisión de partículas



Nota. Formación de partículas de partículas en un MCI. Tomado de (Payri & Desantes, 2011).

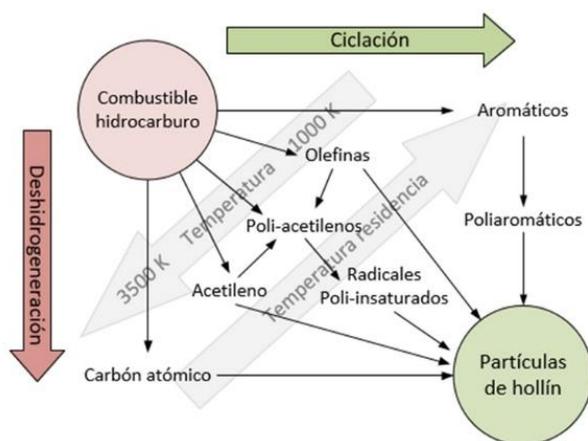
En la Figura 12, se describen las características físicas y químicas de las partículas partiendo del estudio del substrato inicial que se conoce como hollín, sus principales mecanismos de formación, así como la composición y sus características morfológicas como hollín, formación de las partículas y composición, distribución de tamaños de partículas.

Hollín.

El hollín es el residuo de la combustión incompleta de un MCI y de otros contaminantes, se constituye de partículas sólidas de tamaño muy pequeño, pero muy abrasivos y dañinos para los componentes del motor (Carrera Jose Luis et al, 2009). En la Figura 13 se detallan los procesos de formación de hollín en el motor en base a los componentes de los combustibles.

Figura 13

Esquema de los procesos de formación de hollín



Nota. Formación de partículas de carbón en un MCI. Tomado de (Payri & Desantes, 2011).

La formación de las partículas de hollín desde la llama al sistema de escape es generada por varias etapas que se describen a continuación:

Nucleación

Es el proceso en el que se produce la formación de una fase sólida (partículas de hollín) desde una fase vapor en regiones localmente ricas de combustible y altas temperaturas (entre 1300 – 1600 K). Este proceso, generalmente, consiste en la adición de pequeños hidrocarburos radicales a moléculas aromáticas de mayor tamaño, hasta que estas alcanzan un tamaño suficiente como para convertirse en un núcleo de partícula con un diámetro en el rango de

1–2 nm y 10 *uma*. Este núcleo posteriormente en la etapa de crecimiento superficial irá progresivamente disminuyendo su proporción de hidrógeno. Debido a su pequeño tamaño estas partículas no contribuyen significativamente a la masa total del hollín, ya que actúan como núcleos para el posterior crecimiento superficial. La nucleación tiene lugar cerca de la zona de reacción primaria, donde la temperatura y la concentración de radicales e iones con máximas, tanto en llamas premezcladas como en difusivas (Payri & Desantes, 2011).

Crecimiento de una Partícula Primaria de Hollín

Superficialmente en esta etapa se produce la adición de masa en la superficie de una partícula ya nucleada. En este proceso se añaden hidrocarburos en fase gas, generalmente acetilenos y *PAH*, en los sitios reactivos de la superficie de las partículas y a alta temperatura.

Esta etapa suele ocurrir simultáneamente a la nucleación, y es en esta etapa donde se produce la mayor parte de la masa de hollín, y por tanto es importante el tiempo en que se encuentran las partículas en esta etapa para determinar la cantidad másica y volumétrica de hollín, mientras que el número de partículas no se ve afectado por este proceso.

El crecimiento superficial se da desde la zona de reacción primaria hasta otras regiones con una menor temperatura y menor concentración de hidrocarburos. La tasa de crecimiento superficial de las partículas de menos tamaño es más alta que las de mayor, debido a que tienen más sitios activos por unidad de masa.

Por tanto, este proceso resulta en una reducción significativa del número de partículas, un aumento del tamaño de las mismas manteniendo constante la masa de las partículas (Payri & Desantes, 2011).

Límites de Emisiones Gaseosas Permitidas en el Ecuador

El rango de emisiones gaseosas en el país para los vehículos con motor Otto está determinada por la norma NTE INEN 2 204 Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por las fuentes móviles terrestres de gasolina. Dicha norma establece las siguientes condiciones:

Toda fuente móvil con motor de gasolina durante su funcionamiento a una temperatura normal de operación y en condición de marcha mínima o ralentí, no debe emitir al aire monóxido de carbono (*CO*) e hidrocarburos (*HC*) en cantidades que excedan los valores señalados en la Tabla 10.

Tabla 10

Límites máximos de emisiones permitidos para vehículos con motor de ciclo Otto

Año modelo	% CO		Ppm HC	
	0 -1500	1500 - 3000	0 - 1500	1500 - 3000
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

Nota. Límites de emisiones producidas por vehículos automotrices. Tomado de (Norma NTE INEN 2 204 Gestión Ambiental, 2017).

De acuerdo a la configuración y el diseño de cada equipo analizador de gases este podrá medir de manera simultánea los residuos como: *HC, CO, CO₂, O₂, NO, NO₂, NO_x*, además del coeficiente de opacidad y la concentración de masa de partículas como partículas por millón (ppm), g/km y porcentaje.

Descarbonización de motores

En el interior del motor, en la cámara de combustión, se quema el combustible y se genera la potencia necesaria para que un vehículo se desplace. También es el sitio dónde se generan los residuos sólidos resultantes de la combustión de combustibles fósiles.

Estos residuos (carbonilla) afectan e interfieren a la eficacia del motor. Pero no solo eso, ya que también afecta a los sistemas externos a la cámara de combustión, como la admisión y el escape, donde se puede acumular hasta 150 mm de grosor de carbonilla. (HHO Ibérica, 2022)

Los factores principales responsables de la pérdida de prestaciones en el motor del vehículo son:

- El desgaste de materiales por su uso.
- Acumulación de residuos (carbonilla).

El problema de la acumulación de carbonilla se puede resolver con la descarbonización y así alargar el tiempo de vida útil del motor.

La descarbonización limpia la cámara de combustión y todas las piezas que intervienen en el proceso de combustión y escape.

Uso del HHO para descarbonización de MCI

Los motores de combustión, sea cual sea el combustible fósil usado, carbonizan poco a poco las partes internas, cámara, bujías, válvulas, inyectores, colectores, etc. Como se observa en la Figura 14 el mantenimiento recomendado de los fabricantes no es suficiente para evitar la acumulación de carbonilla.

Figura 14

Partículas de carbón acumuladas en la cámara de combustión de un MCI



Nota. Carbón acumulado por la combustión en un MCI. Tomado de (HHO Carbon Cleaner, 2022).

El alto poder calorífico del gas oxihidrógeno (HHO), inyectado en el motor, hace que la temperatura de la combustión suba rápidamente y origine una pirolisis controlada capaz de eliminar la gran parte de la carbonilla acumulada en el motor en un tiempo aproximado de 2 horas.

Figura 15

Etapas de la descarbonización de los MCI



Nota. Proceso de descarbonización de un MCI. Tomado de (HHO Carbon Cleaner, 2022).

La descarbonización se puede hacer a todo tipo de vehículos, ya sean turismos, furgonetas, camiones o motocicletas. Además, también se puede aplicar en cualquier tipo de motor independientemente del tipo de combustible que utilice.

Capítulo III

Diseño y Construcción del Descarbonizador

Introducción

La máquina descarbonizadora es un equipo de mantenimiento preventivo que consta de un generador de hidrógeno de celdas secas, un sistema automatizado temporizador- relé y de un panel de control, donde se regula el tiempo de trabajo del equipo y el flujo de gas hidrógeno que ingresa al vehículo a través del sistema de admisión de aire. Para que el equipo de mantenimiento sea transportable requiere de una fuente de alimentación el cual va a ser la batería del mismo vehículo a descarbonizar.

El presente capítulo detalla de manera clara y específica el diseño y construcción del descarbonizador dividido en módulos mecánicos, eléctricos y electrónicos que trabajan en conjunto.

Método de Evaluación de Soluciones

Máquina generadora de hidrógeno para uso de mantenimiento preventivo automotriz.

Se pretende diseñar y construir una máquina generadora de hidrógeno para descarbonizar motores de combustión interna.

Solución A: Máquina generadora de hidrógeno de celdas húmedas, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador de 4 horas, con el manejo de 2 técnicos operarios.

Solución B: Máquina generadora de hidrógeno de celdas húmedas, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador ajustable hasta 12 horas, con el manejo de 3 técnicos operarios.

Solución C: Máquina generadora de hidrógeno de celdas secas para motores solo de 1000cc, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador de 4 horas, con el manejo de 2 técnicos operarios.

Solución D: Máquina generadora de hidrógeno de celdas secas para motores desde 1000cc hasta 2000cc, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador ajustable hasta 12 horas, con el manejo de 3 técnicos operarios.

Solución E: Máquina generadora de hidrógeno automatizada de celdas secas para motores desde 1000cc hasta 3000cc, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador ajustable hasta 2 horas, con el manejo de 1 técnico operario.

Los criterios de valoración que se consideraron más determinantes fueron:

a) Precio medurado: máquina de uso automotriz para mantenimiento preventivo en motores de combustión interna a gasolina.

b) Mantenimiento sencillo: en el sistema electrónico y mecánico una vez al año.

c) Regulación: control y regulación de flujo de gas hidrógeno por medio de sensores y módulo PWM.

d) Temporizador: permite la visualización, configuración y automatización del tiempo de trabajo de la máquina.

e) Amperímetro: facilita la visualización de la cantidad de amperios que trabaja la máquina, esto con la finalidad de controlar el flujo de gas generado.

f) Tiempo de trabajo: a menor sea el flujo generado, mayor tiempo de trabajo y viceversa, se debe considerar que a mayor cantidad de hidrógeno generado por minuto la máquina aumenta la temperatura de funcionamiento.

g) Fácil Operación: la puesta en marcha de la máquina generadora de hidrógeno deber ser de fácil manejo para los técnicos operarios.

Con los datos iniciales en la Tabla 11, se realizará una evaluación de los pesos específicos de cada uno de los criterios detallados anteriormente.

Tabla 11*Evaluación de los pesos específicos según los criterios*

Criterio	Regul.	Veloc.	Tempo.	Ampe.	Precio	Oper.	Mant.	$\sum +1$	Pond.
Regul.		1	1	1	1	1	1	7	0,25
Veloc.	0		1	1	1	1	1	6	0,22
Tempo.	0	0		1	1	1	1	5	0,18
Amper.	0	0	0		1	1	1	4	0,14
Precio	0	0	0	0		1	1	3	0,11
Oper.	0	0	0	0	0		0,5	1,5	0,05
Manten.	0	0	0	0	0	0,5		1,5	0,05
Suma								28	1

Nota. regulación > velocidad > temporizador > amperímetro > precio > operación =
mantenimiento.

Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones planteadas inicialmente para los criterios establecidos.

Evaluación Tabla 12 del peso específico del criterio de precio medurado

Tabla 12*Evaluación del criterio precio medurado*

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\sum +1$	Pond.
Sol. A		0	0	0	0	1	0,07
Sol. B	1		1	0	0	3	0,20
Sol. C	1	0		0	0	2	0,13
Sol. D	1	1	1		0	4	0,27
Sol. E	1	1	1	1		5	0,33
Suma						15	1

Nota. Solución E > solución D > solución B > solución C > solución A.

Evaluación Tabla 13 del peso específico del criterio de mantenimiento

Tabla 13*Evaluación del criterio mantenimiento*

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\sum +1$	Pond.
Sol. A		0	0	0	0	1	0,07
Sol. B	1		0	0	0	2	0,13
Sol. C	1	1		0	0	3	0,20
Sol. D	1	1	1		0	4	0,27
Sol. E	1	1	1	1		5	0,33
Suma						15	1

Nota. Solución E > solución D > solución C > solución B > solución A.

Evaluación Tabla 14 del peso específico del criterio de regulación.

Tabla 14*Evaluación del criterio regulación*

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\sum +1$	Pond.
Sol. A		0,5	0	0	0	1,5	0,10
Sol. B	0,25		0	0	0	1,5	0,10
Sol. C	1	1		0	0	3	0,20
Sol. D	1	1	1		0	4	0,27
Sol. E	1	1	1	1		5	0,33
Suma						15	1

Nota. Solución E > solución D > solución C > solución A = solución B.

Evaluación Tabla 15 del peso específico del criterio de temporizador.

Tabla 15

Evaluación del criterio temporizador

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\Sigma +1$	Pond.
Sol. A		0,5	0	0	0	1,5	0,10
Sol. B	0,5		0	0	0	1,5	0,10
Sol. C	1	1		0,5	0	3,5	0,23
Sol. D	1	1	0,5		0	3,5	0,23
Sol. E	1	1	1	1		5	0,33
Suma						15	1

Nota. Solución E > solución C = solución D > solución A = solución B.

Evaluación Tabla 16 del peso específico del criterio de amperímetro

Tabla 16

Evaluación del criterio amperímetro

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\Sigma +1$	Pond.
Sol. A		0	0,5	0	0	1,5	0,10
Sol. B	1		1	0,5	0,5	4	0,27
Sol. C	0,5	0		0	0	1,5	0,10
Sol. D	1	0,5	1		0,5	4	0,27
Sol. E	1	0,5	1	0,5		4	0,27
Suma						15	1

Nota. Solución B = solución D = solución E > solución A = solución C.

Evaluación Tabla 17 del peso específico del criterio de tiempo de trabajo.

Tabla 17

Evaluación del criterio de tiempo de trabajo

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\Sigma +1$	Pond.
Sol. A		0,5	0	0	0	1,5	0,10
Sol. B	0,5		0	0	0	1,5	0,10
Sol. C	1	1		0	0	3	0,20
Sol. D	1	1	1		0	4	0,27
Sol. E	1	1	1	1		5	0,33
Suma						15	1

Nota. Solución E > solución D > solución C > solución A = solución B.

Evaluación Tabla 18 del peso específico del criterio de fácil operación.

Tabla 18

Evaluación del criterio fácil operación

Criterio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	$\Sigma +1$	Pond.
Sol. A		0	0,5	0	0	1,5	0,10
Sol. B	1		1	0,5	0,5	4	0,27
Sol. C	0,5	0		0	0	1,5	0,10
Sol. D	1	0,5	1		0,5	4	0,27
Sol. E	1	0,5	1	0,5		4	0,27
Suma						15	1

Nota. Solución B = solución D = solución E > solución A = solución C.

Como tabulación de los datos, en la Tabla 19 se encuentran los cálculos para las soluciones mencionadas anteriormente.

Tabla 19

Cálculo de las conclusiones

Criterio	Regul.	Veloc.	Tempo.	Ampe.	Precio	Oper.	Mant.	$\Sigma +1$	Pond.
Sol. A	0,018	0,022	0,018	0,014	0,008	0,005	0,004	0,08	5
Sol. B	0,050	0,022	0,018	0,038	0,022	0,014	0,007	0,17	4
Sol. C	0,033	0,044	0,041	0,014	0,014	0,005	0,010	0,16	3
Sol. D	0,068	0,059	0,041	0,038	0,029	0,014	0,014	0,26	2
Sol. E	0,083	0,073	0,059	0,038	0,036	0,014	0,017	0,31	1

Nota. Resultados y conclusiones de las propuestas para el diseño del equipo descarbonizador.

Análisis: La solución E propuesta tiene prioridad más alta para ser planteada como solución, la misma que es una máquina generadora de hidrógeno automatizada de celdas secas para motores desde 1000cc hasta 3000cc, con medidor y regulador de flujo de gas, temporizador ajustable hasta 2 horas, con el manejo de 1 técnico operario. Siendo las soluciones D, C, B y A en ese orden las más oportunas.

Casa de la Calidad

Yacuzzi Enrique (2003). Dice que el despliegue de la casa de calidad (Matriz QFD) es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los técnicos y las traduce a características técnicas y operativas satisfactorias.

Tabla 20*Requerimientos del Técnico.*

°N	Necesidad	Importancia
1	Tablero de control	4
2	Automatización del equipo	3
3	Económico	5
4	Generación de <i>HHO</i> requerida	5
5	Asegurar que el <i>HHO</i> llegue al MCI	4
6	Capacidad de aumento de <i>HHO</i>	4
7	De fácil conexión e instalación	3
9	Funcionamiento máximo de 2 horas por sesión	5
10	Fácil transportación del equipo	4
11	Sencillo mantenimiento	5

Nota. Requerimientos del técnico para el uso del equipo descarbonizador.

La Tabla 20 describe la importancia de cada necesidad que tiene el técnico considerada para el diseño del prototipo. El nivel de importancia se encuentra en una escala de valoración del 1-5.

Bajo esta metodología, se ilustra la traducción de los requerimientos del técnico a las especificaciones de construcción técnica del descarbonizador que se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21*Especificaciones técnicas del sistema*

N°	Especificaciones Técnicas
1	Interfaz de visualización de monitoreo
2	Sistema de adquisición de datos
3	Ajuste de flujo de HHO
4	Alta conductividad eléctrica en el electrolito
5	Impermeabilidad
6	Reacción de ionización irreversible
7	Sistema electrónico fiable
8	Dimensionamiento mecánico

Nota. Esta tabla enumera las especificaciones técnicas que requiere el descarbonizador. Son los requerimientos del cliente traducidos a lenguaje técnico.

Para poder visualizar la correlación entre las características técnicas y los requerimientos del técnico se utiliza símbolos y ponderaciones propios de esta metodología asociados en la Tabla 22.

Tabla 22*Relación entre qué y cómo.*

Símbolo	Significado	Equivalencia
●	Fuerte	9
○	Media	3
△	Débil	1

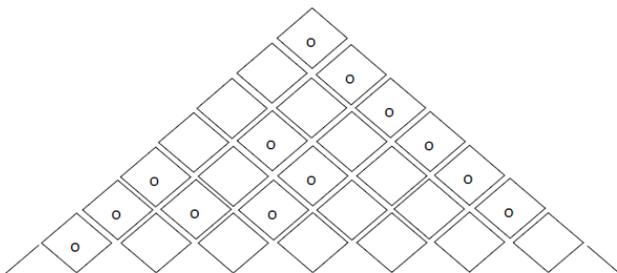
Nota. La tabla muestra el significado de la figura que relaciona las necesidades del técnico y especificaciones técnicas.

Las correlaciones según (Arroyave, 2017).

“Permiten conocer el efecto que tiene un requisito técnico sobre los demás” La simbología utilizada representa O para una correlación positiva y una X para una correlación negativa. En la Figura 16 se puede visualizar el despliegue de la casa de la calidad aplicando la relación y correlación de sus elementos.

Figura 16

Casa de la calidad



Necesidades	Importancia	Requerimientos Técnicos							
		Interfaz de visualización de monitoreo	Sistema de adquisición de datos	Ajuste de flujo de HHO	Alta conductividad eléctrica	Impermeable	Reacción de ionización irreversible	Sistema electrónico fiable	Dimensionamiento mecánico
Tablero de control	4	●	○	○	●	○	●	●	
Automatización del equipo	3		○	○	●	○		△	●
Económico	5	○	●	○	○	○		○	
Generación de HHO requerida	5	○	●	○	○	△	△	○	
Asegurar que el HHO llegue al MCI	4	△	●	●	○	○		△	
Capacidad de aumento de HHO	4	△	○	○	△	△		●	●
De fácil conexión e instalación	3		△	△	●	●	●		
Alarma sonora	3	○		△	△	●	●	△	
Funcionamiento máximo de 2 horas por sesión	5	●	○	○	○	●	●	○	
Fácil transportación del equipo	4		●					●	
Sencillo Mantenimiento	3	●	●	○	○	○	○	●	
Peso Absoluto		173	258	135	169	171	155	208	63
Peso Relativo		10,012	14,931	7,8125	9,7801	9,8958	8,9699	12,037	3,6457
Importancia Relativa		4	2	8	6	5	7	3	10

Σ Peso Absoluto	1332
Σ Peso relativo	78

Nota. Casa de la calidad: correlaciones entre las necesidades del cliente con los subsistemas para el desarrollo del prototipo.

Análisis de la casa de la calidad

La casa de la calidad permitirá focalizar las prioridades que se deben tener en cuenta al momento de diseñar la máquina generadora de hidrógeno. De esta manera se puede cubrir las prioridades de los clientes, una evaluación con la competencia, las características técnicas que la diferenciara, las relaciones fuertes, débiles y bajas que la caracterizaran. Las necesidades principales del técnico se han clasificado mediante el peso relativo, los resultados que arroja la matriz para un diseño que cumpla satisfactoriamente los requerimientos de la empresa son:

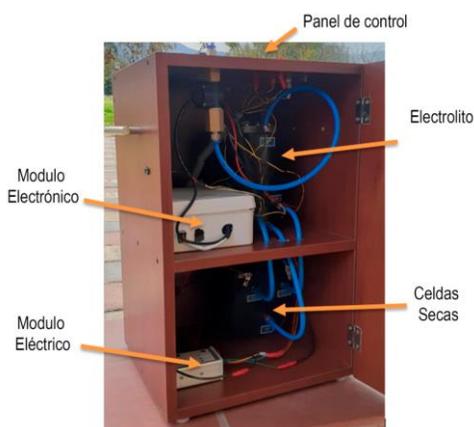
- Módulo de las celdas secas
- Módulo del electrolito
- Módulo eléctrico
- Módulo electrónico (panel de control y automatización)
- Ensamblaje y trabajo en conjunto entre módulos

Diseño y construcción del equipo descarbonizador

Se procede a determinar los módulos de la máquina generadora de hidrógeno para diseñar los componentes posteriormente como se observar en la Figura 17.

Figura 17

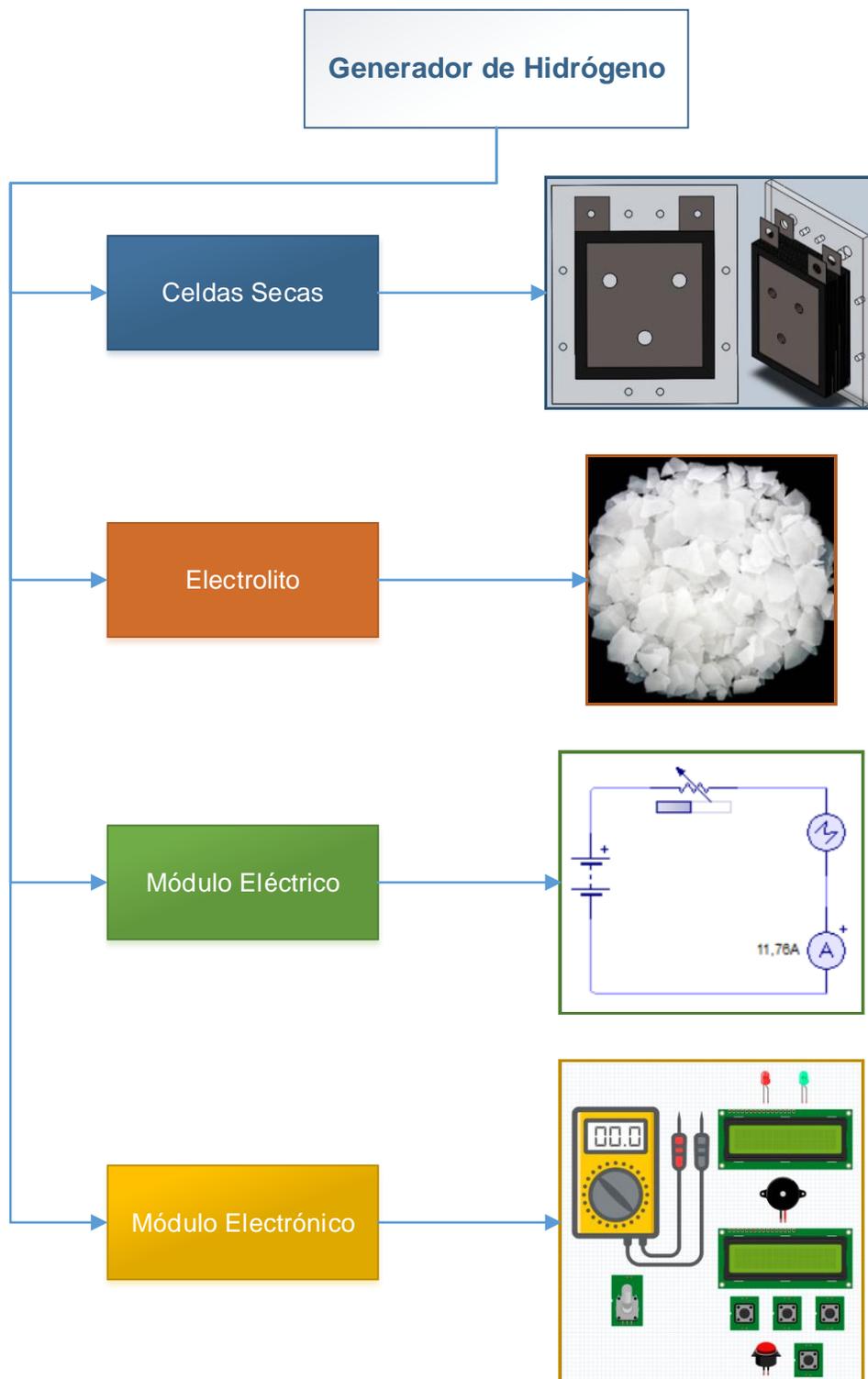
Equipo descarbonizador de MCI



Nota. Equipo descarbonizador y sus módulos ensamblados y trabajando en conjunto.

Figura 18

Módulos que conforman el equipo descarbonizador de MCI



Nota. Módulos que conforman al equipo descarbonizador.

Cantidad de hidrógeno requerida por cilindrada del motor

La Compañía Better Fuel Technology (2022) en sus investigaciones detalla que la cantidad de oxihidrógeno requerida es determinada por la cilindrada del motor, 0,5 *lt/min* por 1 *lt* de cilindrada de motor es lo ideal.

Un motor de 3*lt* conseguirá mejores resultados con un generador que produzca *HHO* en valores de 1,5 *lt/min*.

Mezclando *HHO* con gasolina se mejora la eficiencia del MCI, pero solo hasta un cierto límite. Se ha demostrado en investigaciones de otros autores que ahogar el motor con demasiado *HHO* reduce su eficiencia y rendimiento. En la Tabla 23 se observa la cantidad de *HHO* recomendado a ser suministrado en base al cilindraje del motor (Better Fuel Technology, 2022).

Tabla 23

Caudal Volumétrico de HHO recomendado en base al cilindraje del motor.

Cilindraje del motor	Oxihidrógeno <i>HHO</i>
<i>lt</i>	<i>lt/min</i>
1	0,5
1,6	0,8
1,8	0,9
2	1,0
2,3	1,15
2,5	1,25
2,8	1,4
3	1,5

Nota. Relación caudal del HHO – cc del MCI. Tomado de (Better Fuel Technology, 2022).

Número de electrodos necesarios.

Para determinar la cantidad de electrodos necesarios, se debe calcular la cantidad de hidrógeno generado en litros por minuto, esta producción se la considera por juego de electrodos polarizados (positivo y negativo), con el valor obtenido y con la Tabla 23 se busca alcanzar la cantidad de pares de electrodos necesarios para un motor de 3.0L.

Para calcular la cantidad de hidrógeno producido por semicelda del generador es necesario realizar los siguientes cálculos:

Cantidad de carga necesaria para la electrólisis. El proceso de desprendimiento de los gases del electrolito comienza cuando circula amperaje suministrado por la batería del vehículo en los electrodos polarizados (ánodo y cátodo) que están en contacto con el electrolito.

A través del cátodo se obtiene el gas Hidrógeno y por el ánodo se desprende el Oxígeno. La reacción del cátodo se expresa analíticamente en la fórmula estequiométrica.

Ecuación 4

Reacción del electrodo cátodo



En donde:

- $2H^{+}$ = 2 moléculas de hidrógeno
- $2e^{-}$ = 2 electrones
- H_2 = Hidrógeno diatómico

Para calcular la producción de gas hidrógeno generado es necesario considerar la corriente suministrada de la fuente, en un intervalo de 60 *seg.*

La carga del circuito de celdas secas se obtiene aplicando la Ecuación 5, donde la corriente mínima para la electrólisis de la celda seca es similar al consumo del radio de un vehículo, 2A.

Ecuación 5

Cálculo de carga eléctrica del circuito de celdas secas

$$Q = I * t$$

$$Q = 2A * 60seg$$

$$Q = 120[C]$$

En donde:

- Q = Carga eléctrica [C]
- I = Corriente mínima de uso [A]
- t = tiempo [min]

Producción de Hidrógeno. Con la cantidad de carga que circula por el sistema de celdas secas se calcula la cantidad de hidrógeno generado en gramos aplicando la Ecuación 6, correspondiente a la segunda ley de Faraday.

La cantidad de hidrógeno producido depende del número de electrones disponibles; es decir $1 \text{ mol de } H = 2F$, por lo tanto, se puede escribir:

Ecuación 6

Cálculo de la masa generada de hidrógeno

$$m_H = \frac{M * Q}{z * F}$$

$$m_H = (120C) * \left(\frac{1F}{96496 C/mol}\right) * \left(\frac{1mol H}{2F}\right) * \left(\frac{1,00797 g/mol}{1molH}\right)$$

$$m_H = 2,2927 [g]$$

En donde:

- m_H = Masa [gr]
- M = Masa atómica
- z = Número de electrones intercambiados en la reacción
- F = Constante de Faraday [C/mol]

Volumen del Hidrógeno generado.**Ecuación 7**

Cálculo del volumen del hidrógeno diatómico

$$V_H = \frac{m_H}{d_H}$$

$$V_H = \frac{2,2927 g}{0,071 g/ml}$$

$$V_H = 32,2927 [ml de H]$$

En donde:

- V_H = Volumen del hidrógeno [ml]
- m_H = Masa del hidrógeno generado [gr]
- d_H = Densidad del hidrógeno [gr/ml]

Caudal de Hidrógeno generado.

Para calcular el caudal de hidrógeno diatómico generado por la reacción del cátodo en la electrolisis se aplica la Ecuación 7, en donde se utiliza el valor obtenido en la Ecuación 8.

Ecuación 8

Cálculo del caudal de hidrógeno diatómico

$$Q_H = \frac{V_H}{t}$$

$$Q_H = \frac{32,2927 \text{ ml}}{1 \text{ min}}$$

$$Q_H = 32,2927 \text{ [ml/min]}$$

$$Q_H = 0,322927 \text{ [lt/min]}$$

En donde:

- Q_H = Caudal de hidrógeno [ml/min]

Una vez calculado el caudal de hidrógeno diatómico generado por electrolisis en el cátodo del circuito de celdas secas, se utiliza la Ecuación 9, para determinar la cantidad de pares de electrodos que se necesitan y la Tabla 23, donde especifica que para un motor de 3,0 lt de cilindraje se requiere 1 lt/min de HHO.

Ecuación 9

Número de electrodos requeridos

$$n_e = \frac{C_{MCI}}{Q_H}$$

$$n_e = \frac{3lt}{0,322927}$$

$$n_e = 9,2965 \text{ pares de semiceldas}$$

$$n_e = 20 \text{ electrodos polarizados}$$

En donde:

- n_e = Número de electrodos
- C_{MCI} = Cilindrada del motor [lt]

Como resultado final, para un vehículo con un motor 3,0lt se requiere suministrar 1,5 lt/min además, necesario diseñar un conjunto 10 de pares de electrodos que conformen la estructura de la celda seca, con una fuente de alimentación de corriente de 2 a 12 [A] para que se genere hidrógeno en las celdas secas a partir de la electrolisis.

Celdas secas

Siendo las celdas secas, el módulo principal, en donde se genera hidrógeno, es necesario tener en cuenta los aspectos o requerimientos que necesita este para poder ser diseñado.

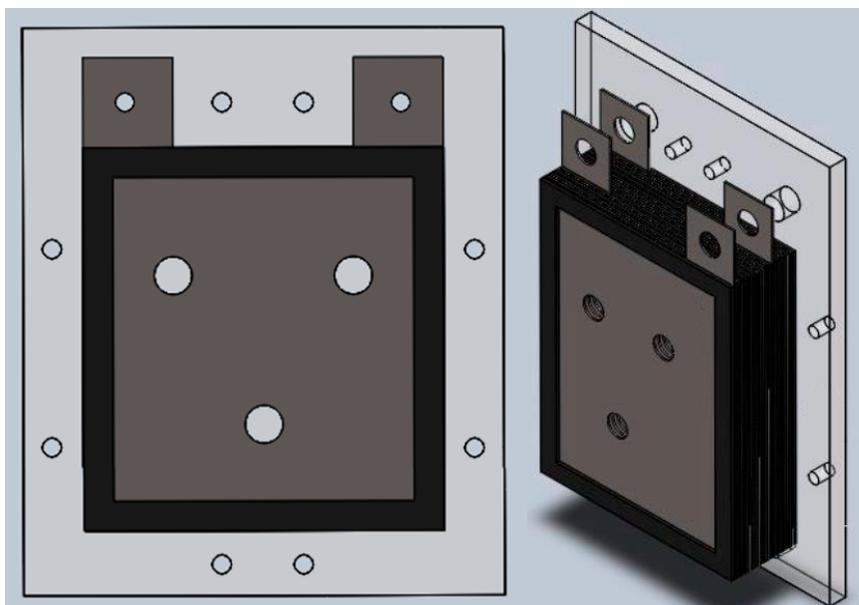
La máquina está pensada en ser diseñada para generar suficiente hidrógeno para un motor 3.0L, es decir, que tenga la capacidad de ser utilizada para motores con cilindraje iguales e inferiores a 3.0L a gasolina, sin importar, la disposición de los cilindros, efecto de los pistones, sistemas de inyección a carburador o inyección, etc.

Las celdas secas están conformadas por electrodos polarizados y neutros, láminas aislantes internas y externas como se observa en la Figura 19.

En base a la investigación realizada por (Rivera Guzmán, 2015), se plantea el diseño de la celda seca con respecto a las dimensiones, cálculos de área y volumen para el presente proyecto.

Figura 19

Electrodos de Celdas secas.



Nota. Diseño de las celdas secas en Software CAD.

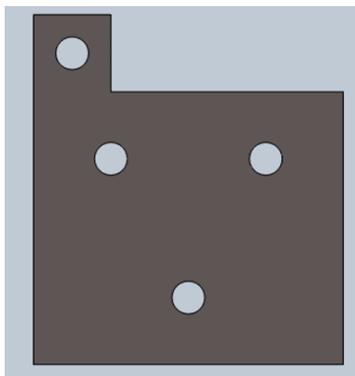
Existen 2 clases de electrodos que la celda seca utiliza: polarizados y neutrales.

Electrodos Polarizados. Corresponden a los electrodos positivos y negativos. Estos tienen la misma geometría y dimensiones.

La celda seca cuenta con orificios por donde entran los elementos de sujeción, de esta forma se ensambla la celda seca electrolítica, como se observa en la Figura 20.

Figura 20

Electrodo polarizado de la celda seca.



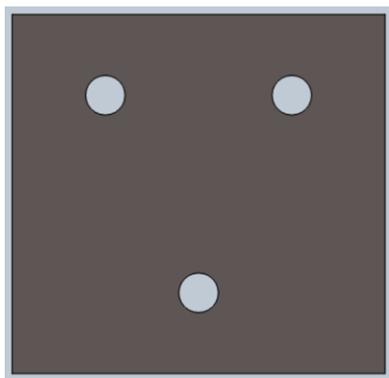
Nota. Diseño de las celdas polarizadas en Software CAD.

Electrodos Neutros. Estos electrodos son los encargados de separar las semiceldas.

Cuentan con orificios por donde entran los elementos de sujeción, como se observa en la Figura 21. De esta forma se ensambla la celda seca electrolítica.

Figura 21

Electrodo neutro del generador de HHO.



Nota. Diseño de las celdas neutras en Software CAD.

Material de los Electrodos. El material conductor necesita tener una alta resistencia a la corrosión, los que más destacan con esta propiedad son los metales ferrosos y no ferrosos. En la Tabla 24 se observa las propiedades de los posibles metales ferrosos y no ferrosos para la construcción de las celdas secas.

Tabla 24

Propiedades de los materiales propuestos para la construcción de la celda seca

Material	Propiedades mecánicas	Aplicaciones
Cromo	Dureza y resistencia a la tensión Capacidad relativa baja de forjado Puro es muy dúctil y puede ser forjado Difícil de almacenar libre sin oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno	Aleaciones de hierro, cobalto o níquel Recubrimiento de metales
Níquel	Poco conductor de la electricidad Poco conductor térmico Aleado con hierro tiene más tenacidad	Aleaciones Crisoles de laboratorios químicos Acuñaación de monedas
Cobalto	Poca resistencia química Metal inminentemente de aleación Poco conductor eléctrico	Aleaciones Electrodos para baterías Cables de acero de neumáticos Secante para pinturas, barnices y tintas.
Plomo	Resistente a la acción del ácido sulfúrico y clorhídrico Capacidad de formar muchas sales y óxidos.	Cubierta para cables Fabricación de baterías Tuberías Blindaje protector de materiales radiactivos
Estaño	Resistente a los agentes químicos Conductor eléctrico y térmico No se oxida fácilmente	Aleaciones Revestimiento protector de varios metales Soldadura blanda

Nota. Materiales conductores como propuesta de selección para las celdas secas. Tomado de (Xunta, 2022).

Los materiales metálicos, en su mayoría presentan una buena resistencia a la corrosión y oxidación, los metales y aleaciones son los más utilizados en aplicaciones para el hogar, sector urbanístico e industrial, como depósitos de combustibles y productos químicos, industria alimentaria, farmacéutica, plantas químicas y de reacciones electroquímicas, componentes automotrices y aeronáuticos.

El acero inoxidable es una aleación de diversos metales en variadas proporciones, debido a sus propiedades mecánicas y por tener una elevada resistencia a la corrosión y oxidación, es el mejor material aleado para este tipo de construcciones electroquímicas (Dipac, 2010).

Se encuentran así el acero inoxidable AISI 304 y AISI 316 cuyas propiedades se aprecian en las Tablas 25.

Tabla 25

Selección del acero para la construcción de los electrodos.

Propiedades Mecánicas	AISI 304	AISI 316
Resistividad Eléctrica	70 – 72 ($\mu Ohmcm$)	70 – 78 ($\mu Ohmcm$)
Módulo de Elasticidad	190 – 210 (GPa)	190 – 210 (GPa)
Dureza Brinell	160 – 190	160 – 190
Punto de fusión	1400 – 1455°C	1370 – 1400°C
Propiedades químicas	18Cr – 8Ni – 2Mn	18Cr – 12Ni – 2,5Mo
Conductividad térmica	16,3 ($W/m * K$)	16,3 ($W/m * K$)
Coefficiente expansión térmica	$18 \times 10^{-6} K^{-1}$	$18 \times 10^{-6} K^{-1}$

Nota. Propiedades mecánicas el acero AISI 304 y 3616. Tomado de (MetalisteriaV3, 2022).

Realizando un análisis de los dos materiales, se interpreta que su composición propiedades anticorrosivas y antioxidantes son similares y que cualquier de estos materiales sirven para la construcción de la celda electroquímica seca, sin embargo, hay que considerar la disponibilidad del material en el mercado nacional. Como referencia se ha tomado el Catálogo IPAC del año 2019, en la sección de planchas galvanizadas e inoxidable, donde se detalla los materiales y dimensiones disponibles reflejadas en la Tabla 26.

Tabla 26

Materiales y Dimensiones de las Planchas de Acero Inoxidable

Dimensiones					
Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.	Norma	Precio
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg</i>		
1000	2440	0,4	9,35	AISI 316 BA	
1000	2440	0,60	14,02	AISI 316 BA	\$120,00 -
1000	2440	0,70	16,36	AISI 316 BA	\$150,00
1000	2440	1,00	23,37	AISI 316 BA	
1220	2440	0,60	14,02	AISI 304 BA	
1220	2440	1,20	28,04	AISI 304 BA	\$120,00 -
1220	2440	1,50	35,05	AISI 304 BA	\$180,00

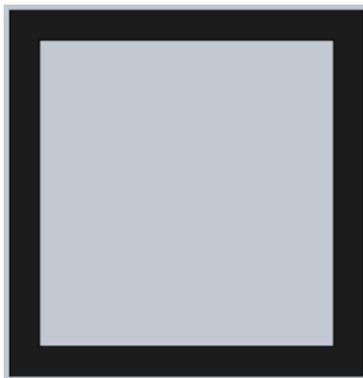
Nota. Dimensiones disponibles en el mercado para el acero AISI 316 y 304. Tomado de (Catálogo IPAC 2019, 2019).

En base a la información citada sobre el material conductor, considerando propiedades mecánicas de anti corrosión y oxidación, además de factibilidad de adquisición del material en el mercado nacional y su precio, se selecciona el Acero Inoxidable AISI 316.

Láminas Aislantes. La celda seca ocupa dos tipos de material aislante, uno de ellos debe estar en los extremos y paralelamente servirá como soporte y brindará un diseño más robusto, el segundo se encuentra entre las semiceldas para que no tengan contacto entre ellas.

Figura 22

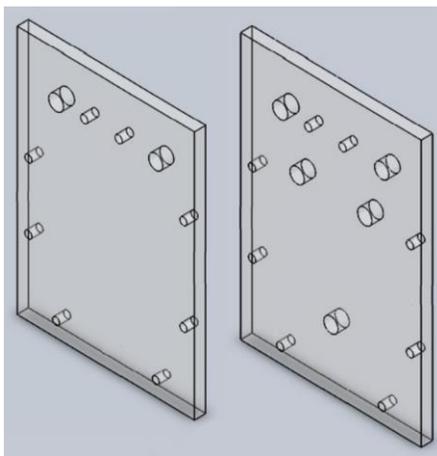
Lamina aislante interna.



Nota. Diseño de las láminas aislantes internas en Software CAD.

Figura 23

Lámina Aislante Externa.



Nota. Diseño de las láminas aislantes externas en Software CAD.

Material de las Láminas Aislantes. Las características que debe tener un material para esta función es que tenga baja o nula conductividad y alta resistencia eléctrica. Los materiales con estas propiedades son los polímeros aislantes que son resistentes al flujo de electrones debido a la baja cantidad de partículas subatómicas. Esto hace que la carga eléctrica tenga dificultad para transitar por el cuerpo, en la Tabla 27 se detallan los materiales que se pueden utilizar para aislar la conductividad entre semiceldas.

Tabla 27

Materiales para diseñar láminas aislantes.

Material	Descripción	Propiedades
Neopreno	Pertenece a los elastómeros plásticos, este material puede deformarse con facilidad sin modificar su estructura o sin romper sus enlaces	Aislante eléctrico Resistencia a la degradación Coeficiente de transmisión de calor muy bajo Impermeable.
Etilvinilacetato	Más conocido como EVA o también como fomix, es un termoplástico muy utilizado en manualidades.	Aislante eléctrico Baja absorción de agua
Acrílico	Conocido también como PMMA, es un material termoplástico rígido y transparente. En su estado natural es incoloro pero se puede pigmentar para obtener una infinidad de colores.	Rigidez y estabilidad dimensional Alta resistencia al desgaste Aislante eléctrico

Nota. Selección de los materiales para el diseño de las láminas aislantes. Tomado de (Acrylic Reams, 2022).

Se llega a una conclusión, que el material aislante entre las semiceldas va a ser de neopreno, debido a su alta capacidad de impermeabilidad, que estará en contacto permanente con el electrolito y las semiceldas, para los extremos se va a utilizar el acrílico en forma de cubierta de la celda por su rigidez y alta resistencia al desgaste, al estar expuesto al contacto con el ambiente.

Ensamblaje de la celda seca. La semicelda comprende el conjunto del electrodos con polarización, sea este positivo o negativo con los electrodos neutros y las láminas aislantes.

Este conjunto de elementos pertenece a un sistema de celda seca, teniendo como regla general, tener la misma cantidad de semiceldas positivas que de semiceldas negativas, de esta forma se asegura un proceso de electrolisis electroquímica equilibrada. En la Figura 24 se observa el ensamblaje de la celda seca.

Figura 24

Ensamblaje de las celdas secas.



Nota. Módulo ensamblado de las celdas secas.

Módulo Electrolito

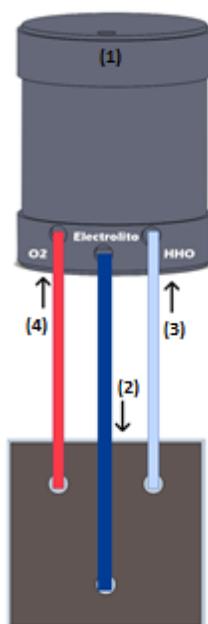
El módulo del electrolito requiere de un sistema hidráulico el cual debe constar de un depósito, mangueras y acoples para que en su interior circule el electrolito.

El depósito debe tener una capacidad mínima de 1 litro para el electrolito, una entrada con tapa hermética para que no permita la salida de los gases o a su vez la entrada de agentes externos que contaminen el electrolito. Debe tener 4 conexiones: para el ingreso y salida de electrolito (1 y 2) hacia las celdas y para el retorno del gas hidrógeno generado desde las celdas hacia el depósito (3) y una salida del gas desde el depósito (4) como se observa en la Figura 25.

El depósito del electrolito debe estar en la parte superior para que por efecto de la gravedad el electrolito descienda y el gas generado ascienda.

Figura 25

Esquema del módulo del electrolito



Nota. Diseño del módulo electrolito en Software CAD.

Electrolito. Es el componente con el que se realiza el proceso electroquímico en el interior de las celdas secas. Para la selección del material correcto que sirva de electrolito en estado líquido para la máquina generadora de hidrógeno es importante considerar que tenga un alto nivel de conductividad eléctrica (S/cm^3) y que genere la menor cantidad posible de gases secundarios.

Debe ser un elemento que se disuelva completamente o en su mayoría en agua libre de minerales, la solución debe ser excelente conductor de corriente eléctrica, estas características lo tienen las sales fundidas como se muestra en la Tabla 28 de los electrolitos con mejor conductividad eléctrica disponibles en el mercado nacional.

Tabla 28

Electrolitos disponibles en el mercado nacional

Electrolito	Conductividad		Propiedades	Costo por Kg
	eléctrica			
	(mS/cm)			
Cloruro de sodio ($NaCl$)	23,7		Cristal pequeño también conocido como halita.	\$2,50
Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$)	9,6		Polvo fino, blanco e inodoro con poca solubilidad en agua.	\$1,00
Nitrato de Amonio (KNO_3)	23,4		Sólido fuertemente oxidante de baja densidad y alta porosidad, muy soluble en agua.	\$3,79
Hidróxido de potasio (KOH)	75,3		Sólido grumoso o escamoso, inodoro y blanco, muy soluble en de agua y de alta conductividad eléctrica.	\$4,00

Nota. Propuesta de selección de materiales para que sirva como electrolito. Tomado de (Ecostandar, 2022).

Selección del Electrolito. Para que las celdas secas generen la mayor cantidad de HHO con el menor amperaje, es necesario utilizar un electrolito con la mayor conductividad eléctrica que disponga el mercado nacional, el hidróxido de potasio es el producto que, por su precio y la facilidad de adquisición es el idóneo para el proyecto de investigación, el producto se lo encuentra en estado sólido en forma de escamas como se observa en la Figura 26. Se debe mezclar 25gr de hidróxido de potasio con 1lt de agua destilada, pues este es un líquido libre de minerales y sales, de esta forma no se generan gases secundarios en la electrólisis.

Figura 26

Hidróxido de potasio en forma de escamas.



Nota. Selección de hidróxido de potasio como electrolito para el equipo descarbonizador.

Materiales y ensamblaje del módulo electrolito. Para la selección de los materiales se ha considerado que sus características sean suficientes para que cumpla con las funciones que se requiere y su fácil adquisición en el mercado nacional. Los materiales para el módulo electrolito se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29*Selección de materiales para el módulo electrolito*

Elemento	Material	Dimensiones	Observaciones
Recipiente	Tubo PVC	D: 10"	Longitud: 300mm
	Tapones para tubo PVC	D:10"	Cantidad: 2
	Acople macho	D: 5/16"	Cantidad: 8
Conductor	Manguera de polietileno	D: 5/16"	Longitud: 7m
Electrolito	Hidróxido de potasio	20 gr	Tiempo de vida útil 1 año
	Agua destilada	1lt	

Nota. Materiales utilizados para el diseño y construcción del módulo electrolito.

Figura 27*Módulo electrolito ensamblado*

Nota. Construcción del módulo electrolito del equipo descarbonizador.

Módulo eléctrico

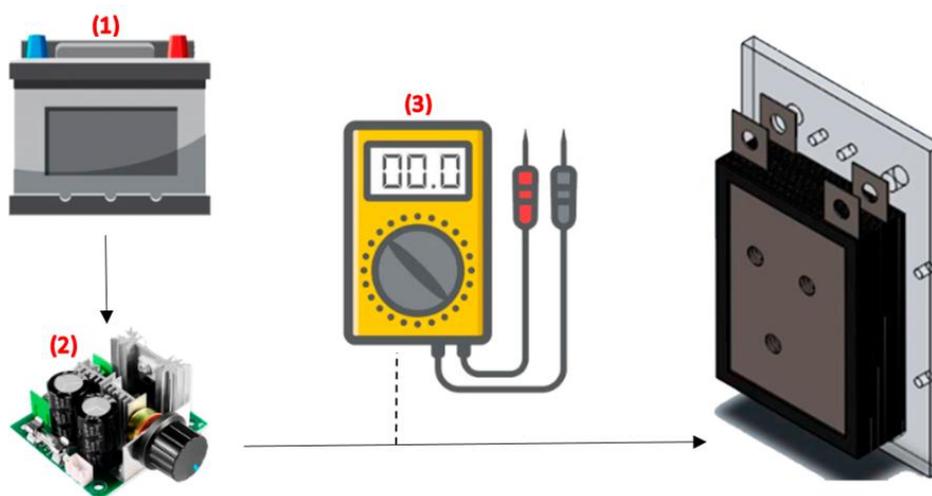
El módulo eléctrico de la máquina es el encargado de alimentar las celdas secas.

La fuente de alimentación para la máquina generadora de hidrógeno es la batería del vehículo (1) como se observa en la Figura 28.

El módulo de celdas secas necesita de amperaje para generar la cantidad requerida de hidrógeno por el técnico operador (de 2 a 12 amperios), es así que para generar una cantidad específica de hidrógeno es necesario regular el consumo de corriente (2) a través de control PWM (modulación de pulso ancho de amperaje) que se monitorea con un amperímetro (3) en el tablero de control de la máquina.

Figura 28

Esquema del módulo eléctrico

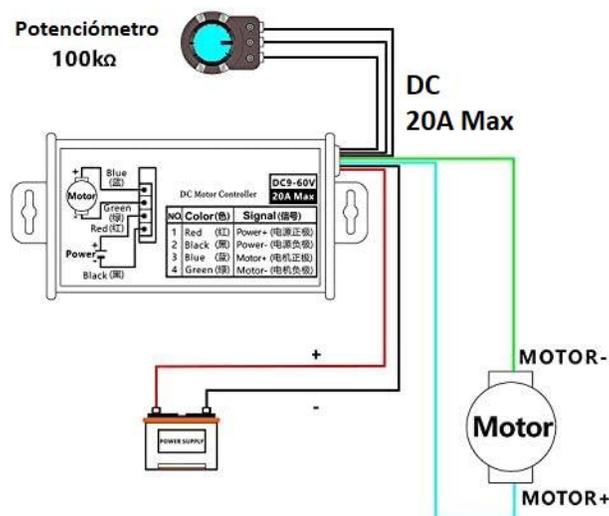


Nota. Esquema de funcionamiento del módulo eléctrico.

PWM DC 9-60V 20A Max. Este módulo permite controlar la entrada de amperaje de un consumidor de DC mediante un voltaje de DC a través del pulso de ancho modulado (PWM) con un ciclo de trabajo completamente ajustable de 0% a 100%. El controlador de velocidad del consumidor puede proporcionar fácilmente una corriente continua hasta de 20A (Control Automatico Educación, 2022).

Figura 29

Esquema de la PWM DC 9-60V 20A Max



Nota. Esquema de funcionamiento de la PWM CD 9-60V 20A Max. Tomado de (Amazon, 2022).

Tabla 30

Selección de los materiales para el módulo eléctrico

Elemento	Material	Dimensiones	Observaciones
PWM	Circuito electrónico	-	20A Max
DC 9-60V			
Cable	Cobre	#12	Longitud: 10m
		#6	Longitud: 15m
Bornes	Cobre	Para batería 12V	Cantidad: 1 par
lagartos para batería 12V	Cobre	Para bornes de batería de 12V	Cantidad: 1 par

Nota. Materiales utilizados para el diseño y construcción del módulo eléctrico.

Potencia consumida

La potencia es la velocidad a la que se consume la energía, para calcular la potencia que consume el generador se utilizan los valores de la Tabla 31, para utilizarlos en la Ecuación 11.

Tabla 31

Características eléctricas de la celda seca.

Especificaciones de la Celda Seca	
Voltaje	12 [V]
Corriente máxima	11 [A]

Nota. Propiedades de una batería de 12V de un vehículo con motor térmico.

Ecuación 11

Cálculo de la potencia de la celda seca

$$P_{cs} = V_{cs} * I_{cs}$$

$$P = 132 [W]$$

Donde:

- P_{cs} = Potencia de la celda seca [W]
- V_{cs} = Voltaje de batería del vehículo [V]
- I_{cs} = Corriente máxima de trabajo de la celda seca [A]

Energía consumida

La energía consumida es la potencia consumida en un tiempo determinado, para la investigación se plantea el uso del generador de *HHO* por el lapso de 2 horas aproximadamente.

Ecuación 12

Cálculo de la energía consumida por hora

$$E_{cs} = P_{cs} t_{uso\ cs}$$

$$E = 132,0 [Wh]$$

Donde:

- E_{cs} = Energía consumida de la celda seca
- $t_{uso\ cs}$ = Tiempo estimado de trabajo de la celda seca

La potencia y energía consumida por el generador es similar a utilizar un radio del vehículo; por lo que no demanda una alta cantidad de energía; entendiéndose así un uso de la celda sin preocupación alguna de uso excesivo de energía.

Módulo electrónico

Figura 30

Panel de control del equipo descarbonizador



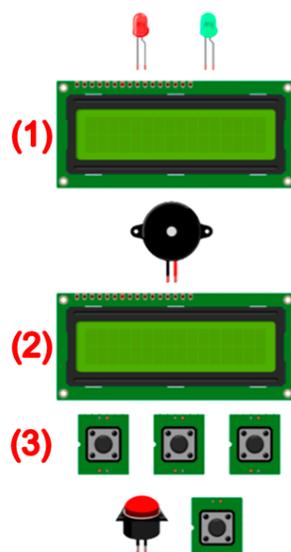
Nota. Panel de control del equipo descarbonizador.

El módulo electrónico de la máquina es el encargado de monitorear el flujo de gas generado por medio de un sensor de efecto Hall instalado en la conexión (4) de la Figura 31, cuya señal se ve reflejada en la pantalla (1) del panel.

Cuenta con un temporizador configurable (2 y 3) con un máximo de dos horas de trabajo

Figura 31

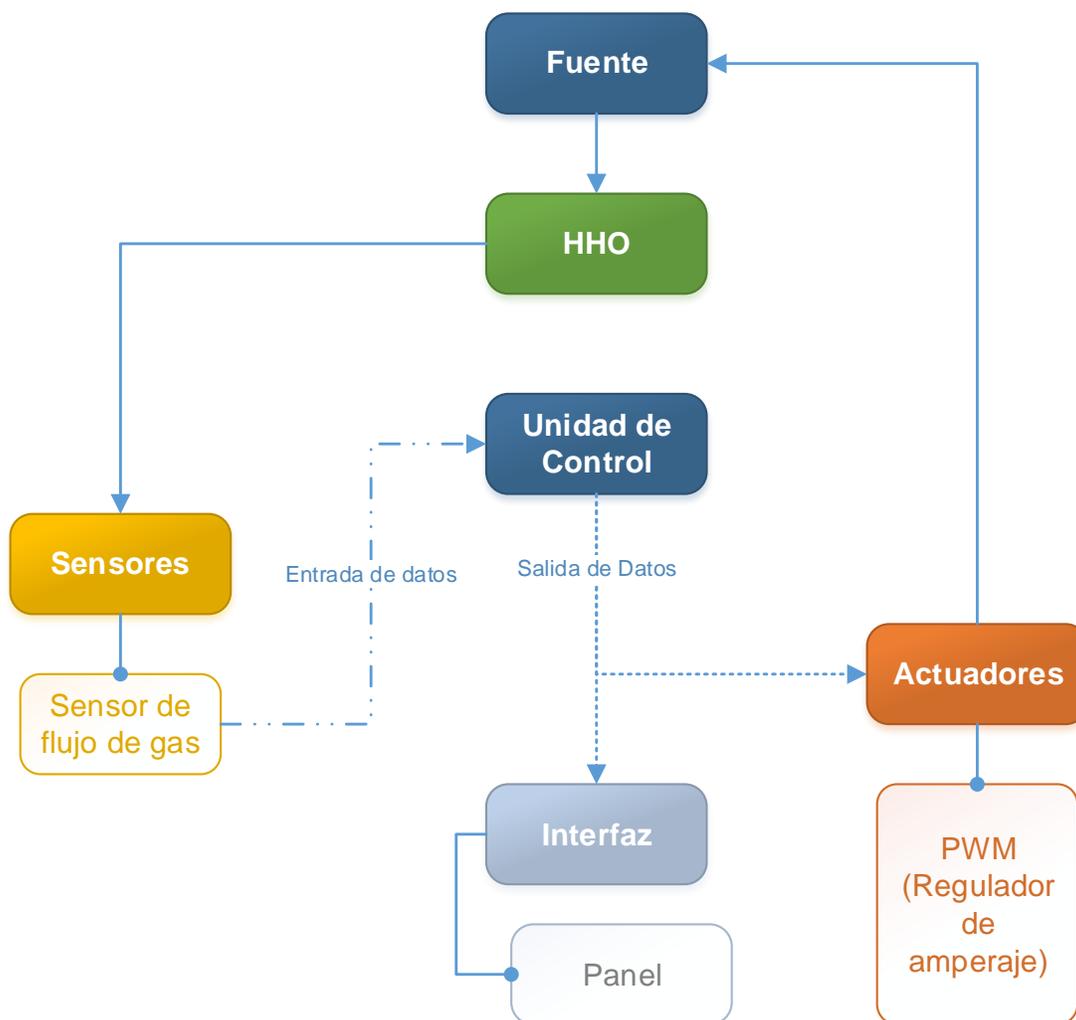
Esquema del panel de control



Nota. Diseño del esquema del módulo electrónico.

Figura 32

Esquema de funcionamiento del módulo electrónico.

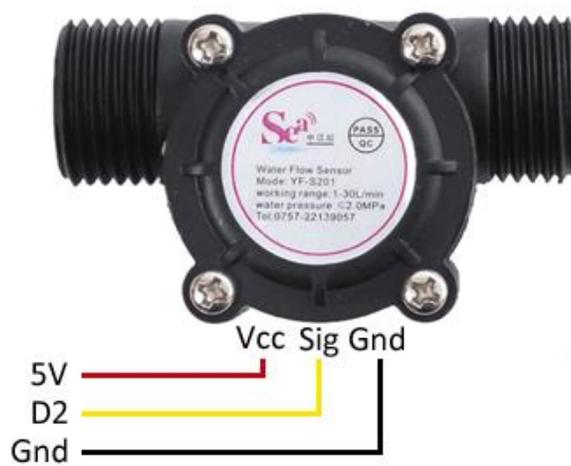


Nota. Esquema de funcionamiento del módulo electrónico del equipo descarbonizador.

Sensor YF- S201. El sensor de flujo YF-S201 sirve para medir caudal de un fluido. Es un caudalímetro electrónico de tipo turbina como se observa en la Figura 33. Compatible con sistemas digitales como Arduino, PIC, Raspberry Pi, PLCs (Naylampmechatronics, 2022).

Figura 33

Sensor YF-S201

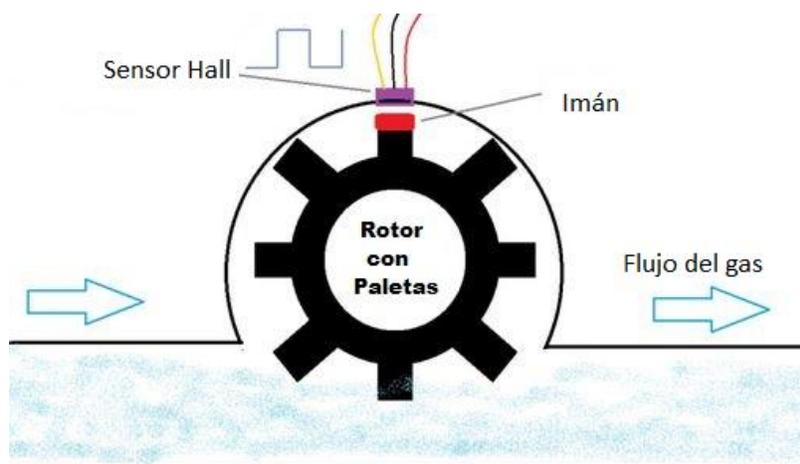


Nota. Sensor de flujo YF-S201. Tomado de (Naylampmechatronics, 2022).

El sensor de flujo tiene tres cables: rojo (VCC: 5VDC), negro (GND) y amarillo (salida de pulsos del sensor de efecto Hall) como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Esquema de conexión del sensor YF-S201



Nota. Esquema de conexión y funcionamiento del sensor Hall de flujo de gas YF-S201. Tomado de (Arduinove, 2022)

Tabla 32*Especificaciones técnicas de los componentes del equipo descarbonizador*

Componente	Alimentación	Corriente	Observaciones
Sensor YF- S201	5V	10mA	Cantidad: 1
Arduino NANO	5V	2A	Cantidad: 1
Pulsadores	5V	10mA	Cantidad: 4
Luz Led	1.7V	10mA	Cantidad: 2
LCD	5V	25mA	Cantidad: 2
Multímetro	9V	80mA	Cantidad: 1
Buzzer	2V	10mA	Cantidad: 1
Relé	5V	2A	Cantidad: 1

Nota. Componentes utilizados para el diseño y construcción del módulo electrónico.

Tabla 33*Componentes electrónicos con sus pines y su tipo de comunicación*

Componente	Pines de conexión	Tipo de comunicación
Led Rojo	D1	HIGH - LOW
Led Verde	D2	HIGH - LOW
Sensor de flujo YF-S201	D3	HIGH - LOW
Buzzer	D4	HIGH - LOW
Pulsador Iniciar	D5	HIGH - LOW
Pulsador HH	D6	HIGH - LOW
Pulsador MM	D7	HIGH - LOW
Pulsador SS	D8	HIGH - LOW
Relé Batería 12V	D9	HIGH - LOW

Componente	Pines de conexión	Tipo de comunicación
LCD Sensor	Pines I2C	I2C
LCD Temporizador	Pines I2C	I2C

Nota. Pines de conexión de los componentes del módulo electrónico.

Tabla 34

Funcionamiento del panel de control

Función	Componentes	Descripción
Control de flujo de gas	Sensor YF-S201 Multímetro Módulo PWM Pantalla LED	Las celdas secas generan hidrógeno dependiendo de la cantidad de corriente que se le suministra, el amperaje se regula por medio de un módulo PWM que tiene una perilla, por medio del multímetro se comprueba la variación de amperaje suministrado, a su vez, el sensor de caudal mide la cantidad de hidrógeno generado, visualizándose en una pantalla LCD.
Temporizador – Relé	Interruptor Led Rojo Led Verde Buzzer Pulsador “Iniciar” Pulsador HH Pulsador MM Pulsador SS	Cuando se acciona el interruptor el LED rojo se enciende como símbolo de que está activado el sistema, pero que aún no trabaja, al mismo tiempo el buzzer suena por un lapso de 1 segundo y las pantallas LCD dan la bienvenida e instrucciones de uso de los pulsadores del panel del equipo descarbonizador y así configurar el tiempo del temporizador.

Función	Componentes	Descripción
	LCD Temporizador	<p>Finalmente, cuando se ha configurado todo a gusto del operador se acciona el pulsador de iniciar, de esta forma el LED rojo se apaga y el verde se enciende, al mismo tiempo el buzzer suena por 1 segundo para indicar que ha comenzado a trabajar el equipo descarbonizador durante el tiempo programado</p> <p>Cuando el tiempo de trabajo ha concluido, el buzzer suena 3 veces como mensaje de finalización y el LED rojo se vuelve a encender mientras el verde se apaga.</p> <p>El sistema Operativo se reinicia y se encuentra listo para otro servicio de descarbonización automatizada.</p>

Nota. Funcionamiento del panel de control del equipo descarbonizador.

Protocolos para la ejecución de la descarbonización con HHO en un MEP.

Para la correcta ejecución y funcionamiento del equipo descarbonizador se debe seguir un procedimiento que permite la inspección, verificación y calibración del equipo antes de su conexión al MCI.

- 1) La disolución de 25gr de hidróxido de potasio en 1lt agua desmineralizada.
- 2) Verter la solución electrolítica en depósito del equipo generador por la parte superior y hermetizar con el tapón para evitar que se contamine el electrolito.
- 3) Instalar el depósito del electrolito en el interior del equipo descarbonizador, posteriormente conectar las mangueras de ¼" con el conjunto de celdas secas por medio de acoples de conexión rápida. Existen 3 conexiones: circulación del electrolito, gas *HHO*, gas O_2 .
- 4) Comprobar que el interruptor del equipo esté abierto.
- 5) Girar la perilla de la PWM en su totalidad a la izquierda, esto para cerrar el paso del amperaje hacia las celdas secas.
- 6) Pulsar el interruptor para encender el circuito del panel de control, inspeccionar que las pantallas LCD estén encendidas y den un mensaje de bienvenida, al mismo tiempo un diodo led rojo deberá estar encendido y el buzzer se encenderá por 0.5seg como mensaje de que el equipo está listo para ser calibrado y para trabajar correctamente.
- 7) El temporizador automáticamente genera el tiempo de trabajo para 2 horas, sin embargo, si el técnico considera modificarlo se puede utilizar los pulsadores de hora, minutos y segundos.
- 8) Realizar el cálculo de flujo de gas *HHO* necesario en base al cilindraje del motor a descarbonizar como se muestra en la Tabla 23.
- 9) Ingresar el vehículo de la bahía de trabajo.

- 10) Encender el vehículo y mantenerlo en ralentí, comprobar el estado de la batería con el voltímetro, el valor de una batería en óptimas condiciones debe estar alrededor de 13.3-15.0V, si se encuentra dentro del rango, se debe colocar los cables de lagarto del equipo a la batería.
- 11) Gire la perilla del multímetro en la sección Amperaje DC.
- 12) Como ya se tiene el valor de flujo de gas *HHO* que el MCI requiere, cuando se dé inicio a la descarbonización, se debe girar hacia la derecha lentamente la perilla de la PWM y fijarse como la pantalla del sensor de flujo comienza a variar, ajustar entonces el valor de flujo de gas *HHO* generado del equipo al valor calculado.
- 13) Tomar la manguera de salida de *HHO* y colocarlo en un recipiente de agua jabonosa, ajustar el tiempo a 5 minutos y pulsar el botón iniciar para que el equipo descarbonizador depure los gases secundarios, así se asegura que al motor ingrese solamente *HHO*. Posteriormente, ajustar la PWM a 8A, el buzzer sonará cuando el tiempo haya concluido.
- 14) Identificar el sistema de admisión de aire del vehículo, conectar la manguera de salida de gas *HHO* que genera el equipo descarbonizador a la entrada de aire del motor y verificar que este no se suelte.
- 15) Ajustar nuevamente el tiempo a 2 horas y presionar el botón, ir ajustando el flujo de gas *HHO* como se indica en el paso 11, el buzzer sonará por 0.5seg cuando se dé inicio la descarbonización y cuando tiempo de trabajo haya concluido.
- 16) Supervisar el desarrollo del proceso de descarbonización cada 15 minutos, específicamente verificar la temperatura del motor en el tablero del vehículo.
- 17) Una vez concluido el tiempo de trabajo del equipo descarbonizador, apagar el equipo por medio del interruptor, de esta forma se abre el circuito controlado por un relé y finalmente desconectar con seguridad los cables lagartos de la batería.

- 18) Retirar la manguera de gas *HHO* que está conectada al sistema de admisión del vehículo.
- 19) Dejar encendido el vehículo por 5 minutos en ralentí, como parte final del proceso de descarbonización, acelerar motor hasta llegar a 3500 RPM de 4 a 6 veces para que los residuos de carbón que se quedaron en el escape del motor sean expulsados.
- 20) Retirar el vehículo de la bahía de trabajo.
- 21) Guarde el equipo de descarbonización en un área sin humedad y a temperatura ambiente.

Capítulo IV

Pruebas, Análisis y Resultados

Para realizar las pruebas se utiliza dos vehículos, el primer vehículo cuenta con inyección electrónica siendo este un Great Wall H5 2.0 L, modelo 2015, y el segundo es una camioneta Chevrolet LUV 2.3 L, modelo 1994, vehículo que cuenta con un sistema de alimentación por carburador.

Se han tomado valores de emisiones antes, durante y después del proceso de descarbonización, con el fin de analizar la efectividad del procedimiento; Además, se realizó medidas de la presión de compresión, para determinar el efecto del HHO en estos indicadores de funcionamiento del motor.

El proceso de descarbonización se desarrolla durante un tiempo de 2 horas, con un flujo de HHO de 1.0 lt/min en el caso del vehículo Great Wall y 1.2 lt/min para el vehículo Chevrolet, la prueba de emisiones de gases se realiza en intervalos de 15 minutos para evidenciar el comportamiento del motor durante la combustión con HHO adicional.

Figura 35

Vehículo Great Wall H5 2.0 L, año 2015



Nota. Vehículo Great Wall H5 2015 preparado para realizar pruebas de emisiones de gases antes del proceso de descarbonización.

Equipos de prueba

Para el análisis del proceso de descarbonización de la cámara de combustión con oxihidrógeno, es necesario el uso de algunos equipos y herramientas como son: videoscopio, analizador de gases, compresómetro y multímetro.

Videoscopio Automotriz

En el campo automotriz es una herramienta ideal para la inspección y el mantenimiento, ya que, por características físicas y calidad óptica, ayuda a reconocer puntos problemáticos de forma rápida y sencilla y permite tomar de forma oportuna medidas preventivas sin necesidad de realizar desmontajes que pueden resultar costosos.

Figura 36

Videoscopio Automotriz para sistemas Android



Nota. Tomado de (HerramientaMundo, 2022).

Analizador de gases

Equipo utilizado principalmente para el diagnóstico de problemas de emisiones de los motores y así maximizar su rendimiento, este equipo ofrece mediciones fiables y facilita el cumplimiento de las normativas de emisiones. El analizador de gases Neomotec CG450 que se muestra en la Figura 37 realiza lectura de CO, CO₂, O₂, HC y factor lambda.

Figura 37

Analizador de gases Neomotec CG450



Nota. Tomado de (Fenixobd, 2022).

Compresómetro

Este equipo es un manómetro, el cual se utiliza para medir la presión de fluidos que se contienen en recipientes cerrados, en el campo automotriz esta herramienta es muy útil para realizar pruebas de compresión y lograr diagnosticar fallas que se presentan por la baja presión de compresión, en la Figura 38 se muestra este manómetro con un rango de medición de 0 a 300 PSI utilizado para el diagnóstico en MCI a gasolina.

Figura 38

Medidor de compresión de cilindros del motor



Nota. Tomado de (AutoDaewooSpark, 2022).

Multímetro automotriz

Un multímetro automotriz se muestra en la Figura 39, es un dispositivo portátil que permite realizar mediciones de varias magnitudes eléctricas dentro de un circuito, estas magnitudes pueden ser: resistencia eléctrica, corriente eléctrica, tensión eléctrica, capacidad, entre otras.

Algunas de las pruebas que se pueden realizar con un multímetro son las siguientes:

- Medición de tensión eléctrica en corriente alterna y corriente continua.
- Medición de intensidad eléctrica en corriente alterna y corriente continua.
- Prueba de continuidad.
- Medición de resistencia.
- Medición de capacitancia.
- Medición de frecuencia.

Figura 39

Multímetro Automotriz o tester eléctrico



Nota. Tomado de (Lubricantes en Venezuela, 2022).

Prueba de generación de hidrógeno

Es importante realizar la comprobación de la generación del *HHO* en el equipo generador, para esto es necesario un recipiente con una solución jabonosa, en dicha solución se ingresa el conducto de salida de hidrógeno del equipo generador y este producirá burbujas en la solución, para verificar que este gas generado es *HHO* se procede a detonar estas burbujas mediante un encendedor o un chispero.

Figura 40

Prueba de la generación del HHO



Nota. En la figura se muestra la solución jabonosa donde se realiza la prueba de la generación de HHO.

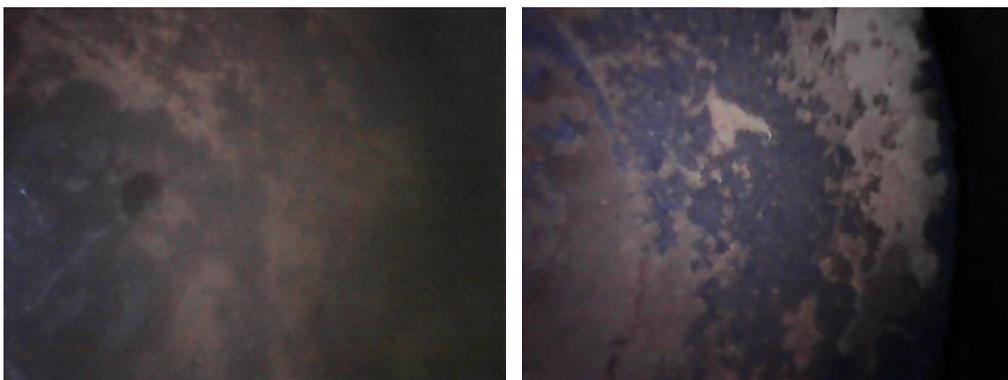
Inspección visual de la cámara de combustión

Mediante el uso de un videoscopio para sistemas Android se puede observar el interior de las cámaras de combustión de cada uno de los cilindros del motor, con el uso de este equipo se pueden realizar tomas sin necesidad de realizar desmontajes que representen costos extras al procedimiento de descarbonización, ya que solo es necesario retirar la bujía para poder acceder al interior de los cilindros.

Este proceso se realiza antes y después de las 2 horas de descarbonización con oxihidrógeno para poder visualizar si se presentan cambios en el interior de los cilindros. Las Figuras 41 y 42 indican el estado de las cámaras de combustión antes del procedimiento tanto en el vehículo Great Wall H5 como en la camioneta Chevrolet LUV.

Figura 41

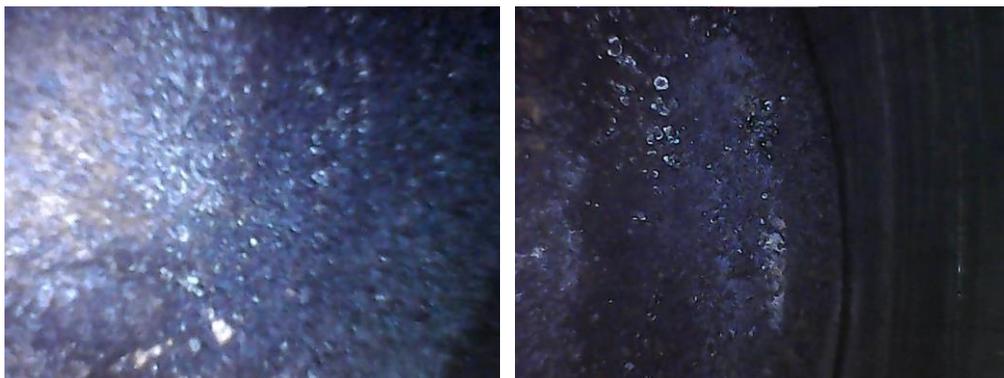
Cámara de combustión antes de la descarbonización Great Wall H5



Nota. Las imágenes muestran el estado de la cámara de combustión antes del proceso de limpieza, se puede observar que existe considerable cantidad de contaminación.

Figura 42

Cámara de combustión de la Chevrolet LUV antes de la descarbonización

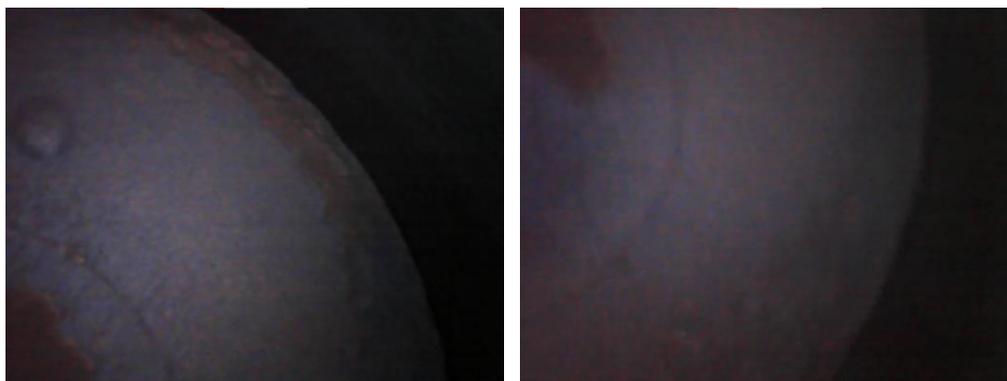


Nota. Las imágenes muestran el estado de la cámara de combustión antes del proceso de limpieza, se puede observar que existe una acumulación de hollín y carbonilla.

Una vez realizado el proceso de descarbonización con HHO durante el periodo de 2 horas en cada uno de los vehículos de prueba se realiza el mismo proceso para observar el estado de las cámaras de combustión y evaluar los posibles cambios.

Figura 43

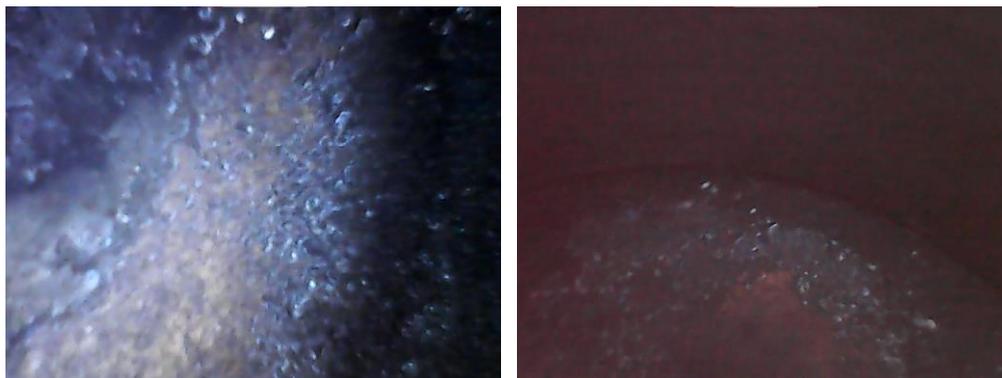
Cámara de combustión después de la descarbonización Great Wall H5



Nota. Las imágenes muestran el estado de las cámaras de combustión después del proceso de descarbonización, se visualiza una cámara más limpia que al inicio del procedimiento.

Figura 44

Cámara de combustión de la LUV después de la descarbonización



Nota. En las imágenes se observa la cámara de combustión de la Chevrolet LUV después de proceso de limpieza y logra diferenciar lugares donde no existe hollín.

Resultados en las pruebas de emisiones de gases de escape.

Resultados en el vehículo Great Wall H5 2.0L

A continuación, se muestra los valores obtenidos en las pruebas de emisiones de gases de escape realizadas en el vehículo Great Wall H5 modelo 2015.

Tabla 35

Datos obtenidos en la prueba de gases de escape en el vehículo Great Wall H5 2015

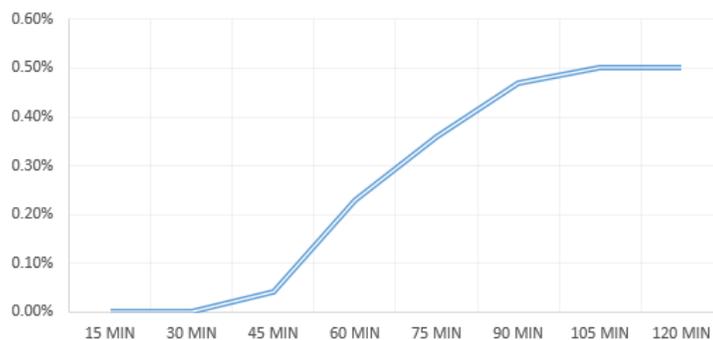
Gas	Valor							
	15 MIN	30 MIN	45 MIN	60 MIN	75 MIN	90 MIN	105 MIN	120 MIN
CO	0.00%	0.00%	0.04%	0.23%	0.36%	0.47%	0.50%	0.50%
HC (ppm)	55	98.00	127	133	136	138	151	133
CO ₂	13.60%	13.60%	13.20%	13.20%	13.20%	13%	12.80%	12.80%
O ₂	0.58%	0.60%	0.70%	0.99%	0.93%	1.08%	1.09%	1.19%
LAMBDA	1.026	1.025	1.028	1.04	1.03	1.033	1.03	1.04
AFR	15.0	15.0	15.1	15.2	15.1	15.1	15.1	15.2

Nota. La tabla muestra las emisiones de escape del Great Wall H5 2.0L durante el proceso de descarbonización en un tiempo de 2 horas, con intervalos de 15 minutos para una evaluación de su comportamiento.

En la Figura 45 se representa el comportamiento y variación de las emisiones de CO mismo que se forma cuando el proceso de combustión es incompleto debido a la falta a oxígeno para quemar de forma completa el combustible inyectado.

Figura 45

Comportamiento del CO en la descarbonización de la cámara de combustión

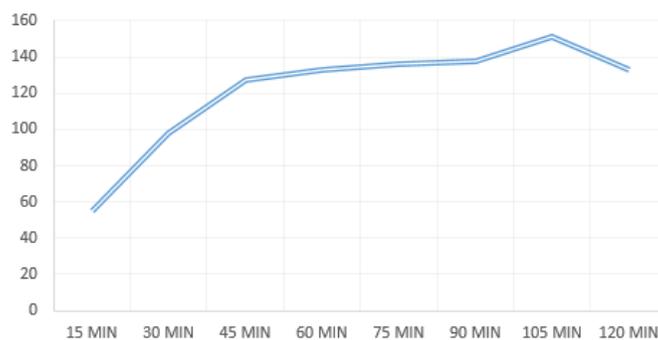


Nota. En el gráfico se muestra las emisiones de CO durante el proceso de descarbonización de la cámara de combustión, para este análisis se toman valores cada 15 minutos durante 2 horas para evaluar dicho comportamiento.

El valor de los hidrocarburos (HC) no combustionados también representan un indicativo del estado del motor, esto suele darse debido a una mezcla rica y/o a fugas de aceite hacia la cámara de combustión, las emisiones de HC se presenta en la Figura 46.

Figura 46

Emisiones de HC del Great Wall H5 durante el proceso de descarbonización

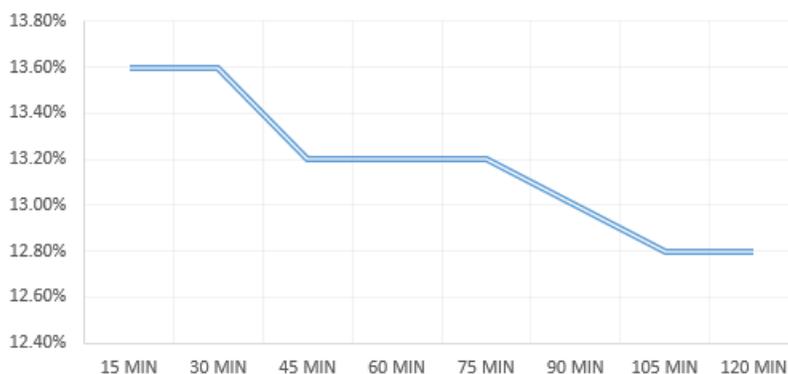


Nota. Los valores de las emisiones de HC son medidas en ppm; Como se observa en el gráfico el valor de los hidrocarburos HC también presentó una variación durante la introducción del oxihidrógeno a la cámara de combustión.

El CO₂ es resultado de la quema del combustible y al igual que los demás gases es expulsado a través del tubo de escape, este depende de la cantidad de energía necesaria para la circulación del vehículo y de la eficiencia del motor. Lo que implica que a mayor consumo de combustible mayor será la cantidad de emisiones de CO₂, el comportamiento de dicho gas se presenta en la Figura 47.

Figura 47

Comportamiento de las emisiones de CO₂ del vehículo Great Wall H5 año 2015

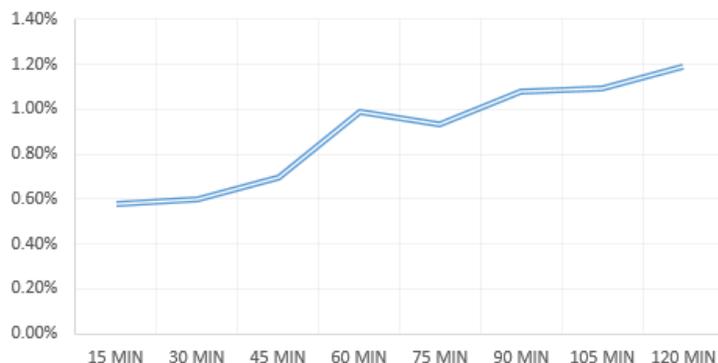


Nota. En el gráfico se observa los datos de las emisiones de CO₂ tomados con el analizador de gases Neomotec CG450.

El O₂ es otro gas que forma parte de las emisiones de escape de un vehículo, en el caso de este gas durante el proceso de descarbonización de la cámara de combustión presenta el comportamiento que indica la Figura 48 que se muestra a continuación.

Figura 48

Emisiones de O₂ del vehículo Great Wall H5 en el proceso de descarbonización

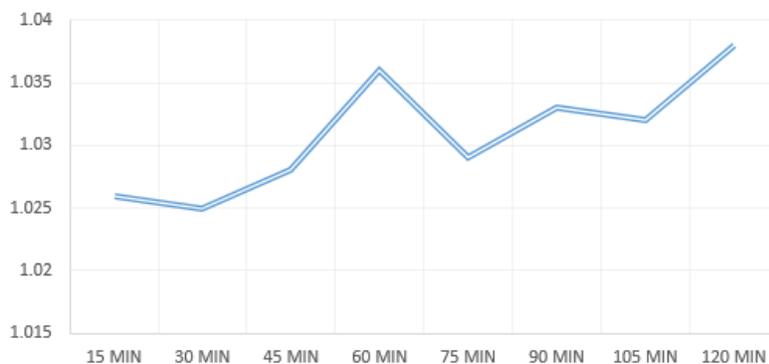


Nota. El O₂ es el oxígeno que sobra de la combustión, este elemento dentro de las emisiones de escape, en un vehículo del año 2015 como es el caso debe tener un valor menor al 3%.

Otro de los indicadores que ayuda a determinar el funcionamiento del motor es la relación Lambda, del cual mediante el equipo Neomotec CG450 se obtuvo los valores y el comportamiento que muestra la curva de la Figura 49 y el factor AFR que determina la relación aire - combustible en la Figura 50.

Figura 49

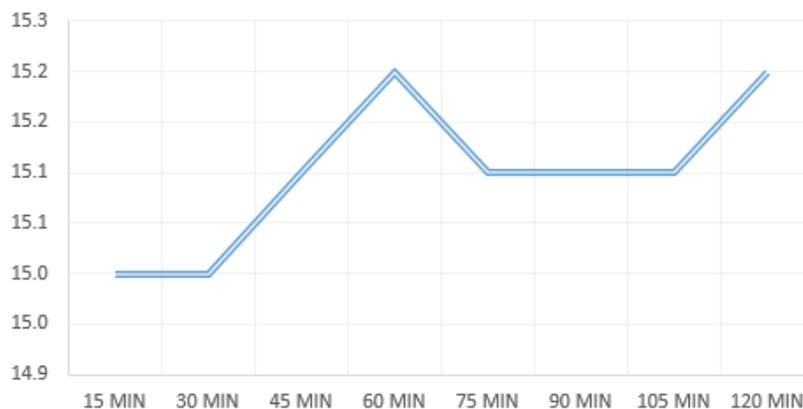
Comportamiento de la relación Lambda durante el proceso de descarbonización



Nota. El factor Lambda (λ) óptimo para el funcionamiento del motor debe ser igual a 1, y es la relación entre el valor de Lambda real dividida para el valor de Lambda óptima.

Figura 50

Variación del Factor AFR durante el proceso de descarbonización



Nota. Este valor es un indicativo de la cantidad de aire que ingresa al motor por cada parte de combustible que está siendo inyectado en el mismo.

Resultados en el vehículo Chevrolet LUV 2.3L

A continuación, se presentan los valores obtenidos en las pruebas de emisiones de gases realizadas durante el proceso de adición de *HHO* a la cámara de combustión durante un periodo de 120 minutos (2 horas) en la camioneta Chevrolet LUV, del año 1994, motor 2.3 L, para el posterior análisis.

Tabla 36

Emisiones de gases en la descarbonización en la camioneta Chevrolet LUV

Gas	Valor							
	15 MIN	30 MIN	45 MIN	60 MIN	75 MIN	90 MIN	105 MIN	120 MIN
CO	1.11%	1.54%	0.75%	0.72%	2.02%	2.36%	1.89%	1.85%
HC (ppm)	481	530	478	446	506	482	488	485
CO ₂	12.10%	11.80%	12.20%	12.00%	11.50%	11.30%	11.50%	10.90%

Gas	Valor							
	15 MIN	30 MIN	45 MIN	60 MIN	75 MIN	90 MIN	105 MIN	120 MIN
O ₂	1.76%	1.75%	1.97%	2.12%	1.70%	1.65%	1.75%	2.54%
LAMBDA	1.031	1.014	1.055	1.066	0.997	0.984	1.004	1.048
AFR	15.1	14.9	15.5	15.6	14.6	14.4	14.7	14.7

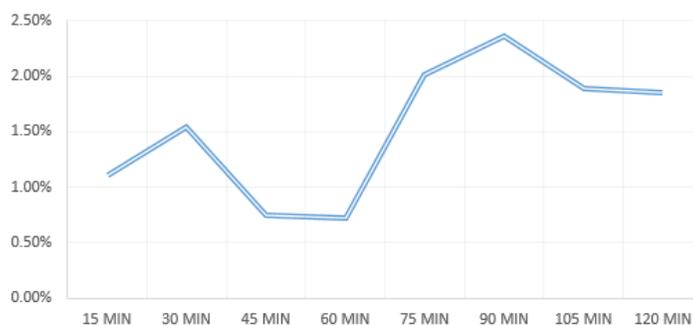
Nota. La tabla muestra las emisiones de la Chevrolet LUV 2.3 L durante el proceso de descarbonización en un tiempo de 2 horas, con intervalos de 15 minutos para una evaluación de su comportamiento.

Con los valores generados de las emisiones de escape del vehículo se genera una gráfica de cada uno de los gases para determinar el comportamiento de los mismos durante el proceso de limpieza de la cámara de combustión.

En las Figuras 51 - 54 se muestran el comportamiento que han tenido los gases de escape: CO, HC, CO₂ y O₂.

Figura 51

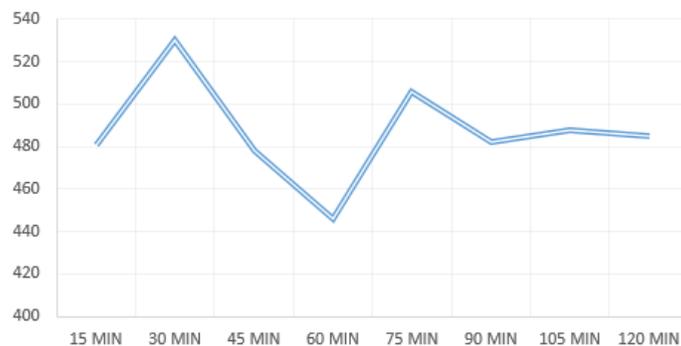
Comportamiento del CO en la descarbonización de la Chevrolet LUV



Nota. La gráfica representa el comportamiento de las emisiones del CO en la camioneta Chevrolet LUV del año 1994, tomando valores cada 15 minutos.

Figura 52

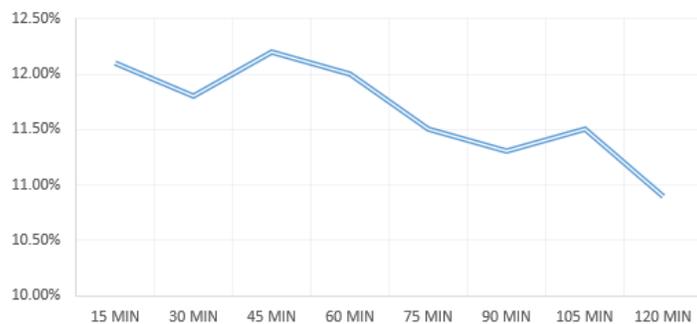
Emisiones de los HC [ppm] – Tiempo [minutos] de la Chevrolet LUV



Nota. La gráfica representa la variación existente en las emisiones de los HC no combustionados durante el proceso de descarbonización con *HHO*.

Figura 53

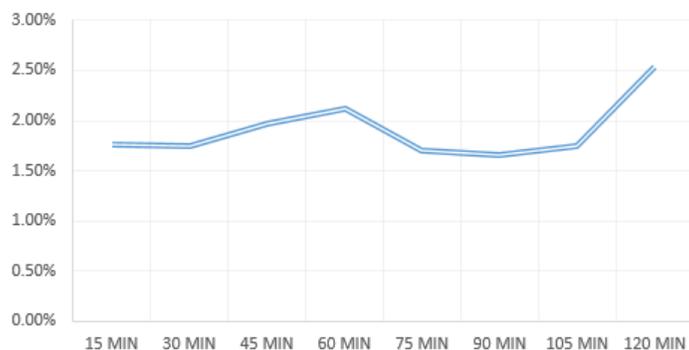
Comportamiento de las emisiones de CO₂ en la camioneta Chevrolet LUV



Nota. El gráfico muestra la variación de las emisiones del CO₂ [%] con respecto al tiempo [Minutos].

Figura 54

Resultado de las pruebas de emisiones de escape del O₂ Chevrolet LUV

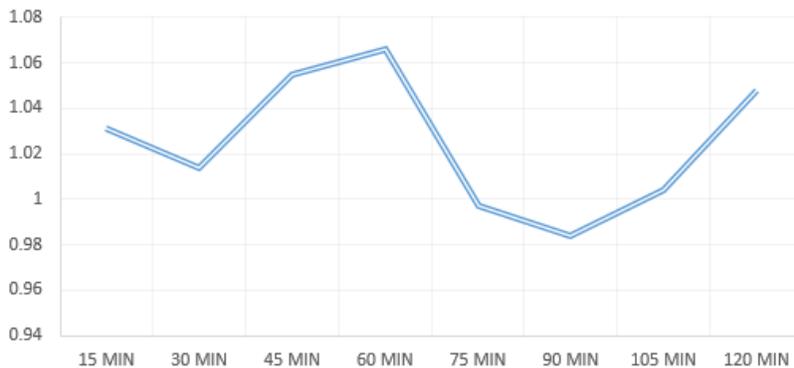


Nota. En la Figura 54 se muestra la variación con el paso del tiempo de las emisiones de O₂, en intervalos de 15 minutos durante 2 horas.

En las Figuras 55 y 56 los factores relacionados con la mezcla y relación aire-combustible durante el ingreso de oxihidrógeno a la cámara de combustión del motor de la camioneta Chevrolet LUV.

Figura 55

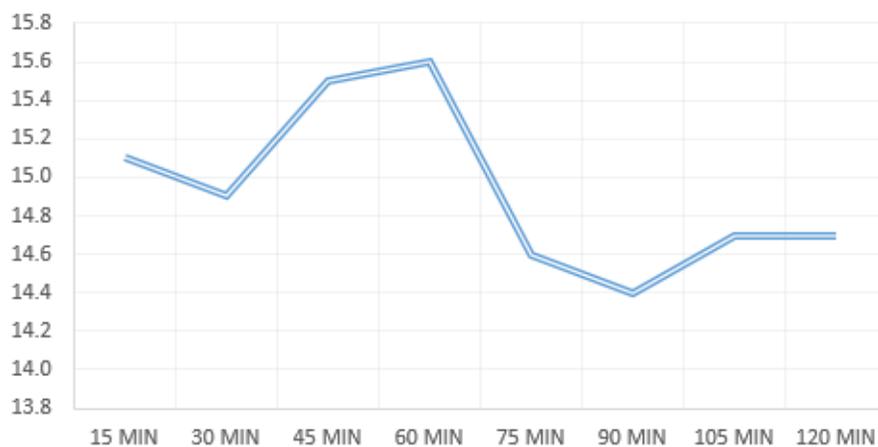
Valores del factor Lambda en la descarbonización en la Chevrolet LUV



Nota. El factor Lambda muestra una variación durante el proceso de descarbonización de la cámara de combustión, tomando un pico máximo en los 60 minutos.

Figura 56

Variación del Factor AFR durante el proceso de descarbonización.



Nota. Este valor es un indicativo de la cantidad de aire que ingresa al motor por cada parte de combustible que está siendo inyectado en el mismo.

Comparativa de emisiones en el vehículo Great Wall H5 2.0L

En la Tabla 37 se comparan los resultados de las pruebas de emisiones de gases realizadas antes y después del proceso de descarbonización en el vehículo Great Wall H5, estos valores fueron tomados con el motor funcionando de forma convencional, sin la aplicación de *HHO*.

Tabla 37*Comparativa de emisiones de gases antes y después en la Great Wall H5*

Gas	Valor		Variación
	Antes	Después	
CO	0.01%	0.07%	+0.06%
HC	16 ppm	2 ppm	-14ppm
CO ₂	13.80%	13.60%	-0.20%
O ₂	0.42%	0.58%	+0.16%
LAMBDA	1.019	1.026	-
AFR	14.9	15.0	-

Nota. Se muestra los valores tomados antes y después del proceso de descarbonización con la variación que presentan cada uno de los gases de escape.

Comparativa de emisiones en el vehículo Chevrolet LUV 2.3L

Antes de realizar el proceso de descarbonización de la cámara de combustión en el vehículo Chevrolet LUV del año 1994, se tomaron datos de las emisiones de escape, estos valores se presentan en la Tabla 38 al igual que los valores que se determinan una vez terminado dicho proceso, antes de tomar los valores posteriores a la descarbonización se desarrolla una pequeña prueba de ruta, para que el motor funcione de forma convencional y elimine todos los residuos generados en la cámara de combustión por el uso del *HHO*.

Tabla 38

Comparativa de emisiones de escape antes y después en la Chevrolet LUV

Gas	Valor		Variación
	Antes	Después	
CO	1.68%	2.37%	+0.69%
HC	368ppm	539ppm	+171ppm
CO2	11.10%	10.10%	-1%
O2	3.26%	2.77%	-0.49%
LAMBDA	1.097	1.04	-
AFR	16.1	15.2	-

Nota. Los datos presentados en la tabla, son los valores tomados antes y después del proceso de descarbonización en la camioneta Chevrolet LUV con la variación de cada uno de los gases de escape.

Prueba de compresión

Para comprobar la condición en la que se encuentra un motor la prueba de compresión es un buen indicador, además es una prueba rápida y muy sencilla.

Los motores necesitan que las presiones de compresión de cada cilindro sean las mismas para que el funcionamiento sea adecuado y estas dependen de la compresión de la mezcla de aire y combustibles para que la energía producida por el motor sea maximizada.

Mientras se cumplen los 4 tiempos de funcionamiento del motor, en el tiempo de compresión en la carrera ascendente en pistón comprime la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión, cuando existen fugas en la cámara de combustión, una parte de la mezcla durante el tiempo de compresión escapa y esto da como resultado una pérdida de potencia en el motor y un gasto excesivo de combustible.

Figura 57

Toma de la presión de compresión del motor del Great Wall H5.



Nota. En la imagen se presenta un compresómetro de la marca Stanley, se observa una lectura de un valor de 120 PSI de presión de compresión en el segundo cilindro.

Procedimiento para medir la presión de compresión

Para la medición de la presión de compresión se puede realizar con facilidad mediante un comprobador de compresión (manómetro).

- Como primer paso se debe llevar al motor a la temperatura normal de funcionamiento (90 °C – 100 °C)
- Se retira el relé o fusible de la bomba de gasolina
- Se deshabilita el sistema de encendido
- Se retira los cables de todas las bujías
- Se desmonta las bujías de todos los cilindros del motor
- Posteriormente se procede a conectar el manómetro en el orificio donde se instala la bujía del primer cilindro
- Se procede a dar golpes de arranque por unos segundos con el acelerador pisado a fondo, es decir se gira la llave para dar marcha al motor.

- Los valores de medición de la compresión de un motor en excelentes condiciones están en un rango de 170 PSI a 185 PSI.
- Anotar la presión medida por el manómetro
- Repetir los 3 puntos anteriores en los cilindros restantes y comprobar los valores con los especificados por el fabricante.

Cabe recalcar que la presión medida debe ser similar en todos los cilindros y a la especificada por el fabricante del motor, la diferencia de estos valores no debe ser superior al 5%.

Medición de la presión de compresión del motor del Great Wall H5 2.0L

Para una evaluación de la eficiencia de la descarbonización de la cámara de combustión con oxihidrógeno, se realizan pruebas de compresión antes y después del procedimiento, en la Tabla 39 se presentan los valores de dichas mediciones.

Tabla 39

Valores de medición de la presión de compresión del Great Wall H5 2015 2.0L

N° Cilindro	Valor (PSI)		% de Variación
	Antes	Después	
1	130	130	0%
2	120	130	8.33%
3	125	130	4%
4	120	125	4.17%

Nota. En la tabla se muestran los valores de presión de compresión antes y después del proceso de descarbonización, con el porcentaje de variación entre dichos valores.

Medición de la presión de compresión del motor del Chevrolet LUV 2.3L

Las pruebas de presión de compresión realizadas en el motor de la Chevrolet LUV se dan antes y después del proceso de descarbonización, para el debido análisis se presentan los resultados en la Tabla 40.

Tabla 40

Valores de medición de la presión de compresión del Chevrolet LUV

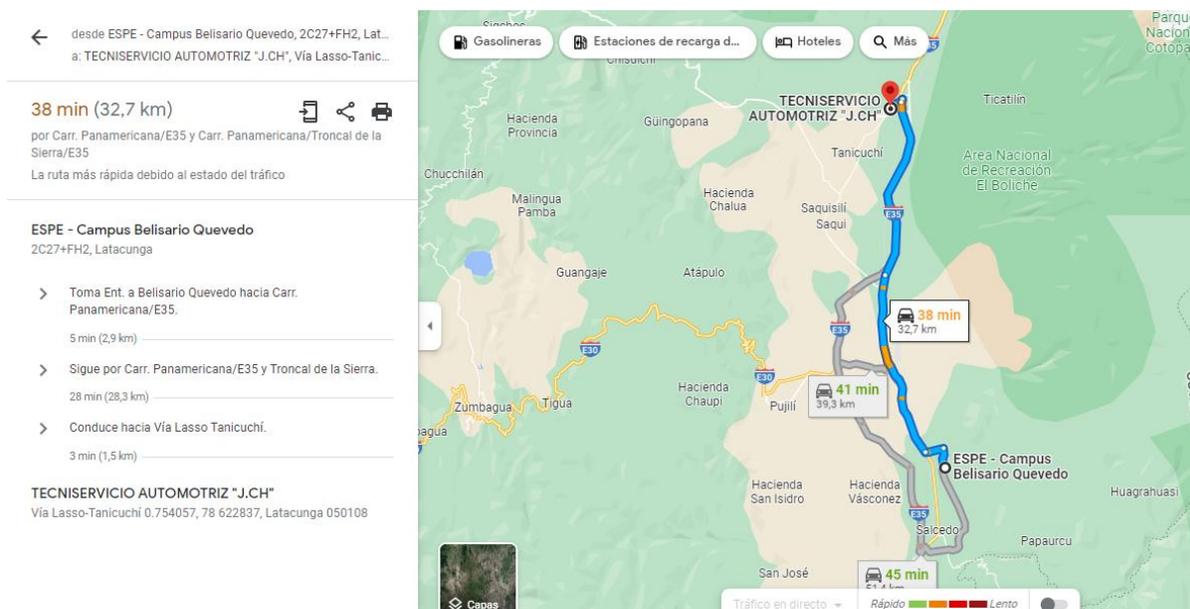
N° Cilindro	Valor (PSI)		% de Variación
	Antes	Después	
1	110	110	0%
2	120	120	0%
3	120	120	0%
4	120	120	0%

Nota. Se muestran los valores de las presiones de compresión tomadas antes y después del proceso de descarbonización.

Prueba de consumo de combustible.

Para realizar las pruebas de consumo de combustible se toma en cuenta el protocolo WLTP el mismo que nos indica que se debe realizar un recorrido mínimo de 23.26 Km, durante un tiempo de 30 minutos, a una velocidad mediana de 46.3 Km/h y una velocidad máxima de 131.6 Km/h.

Para obtener los datos del consumo de combustible se inicia un recorrido con una duración de 32.7 Km, dando inicio en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L campus Belisario Quevedo hacia Lasso, específicamente al taller Tecniservicio Automotriz J.CH., esta ruta se cumple en un tiempo aproximado de 38 minutos, a una velocidad y flujo de tráfico moderado, manteniendo un régimen de giro de 2500 a 3500 rpm, para determinar el consumo de combustible se utiliza el método gravimétrico, que consiste en medir la variación de la masa del tanque para determinar el volumen de combustible consumido durante la prueba.

Figura 58**Ruta para la prueba de consumo de combustible**

Nota. Detalle del trayecto recorrido en ambos vehículos de prueba. Tomada de (Google Maps, 2022).

Resultados de la prueba de consumo de combustible

La prueba de consumo de combustible se realiza antes y después del proceso de descarbonización, tanto en el vehículo Great Wall como en el vehículo Chevrolet, los resultados obtenidos en estas pruebas se presenta en la Tabla 41.

Tabla 41*Datos de las pruebas de consumo de combustible*

Vehículo	Prueba	Distancia (Km)	Velocidad		Cantidad		% Variación
			media (Km/h)	Tiempo (min)	consumida (Km/l)		
Great Wall H5	Antes	32.7	45.7	42	11.5	6.96%	
	Después	32.7	46.2	40	12.3		
Chevrolet LUV	Antes	32.7	45.2	42	9.4	2.13%	
	Después	32.7	45.9	41	9.6		

Nota. En la Tabla 41 se presenta la variación del consumo de combustible en los dos vehículos de prueba.

Capítulo V

Marco Administrativo

Para que la realización de la presente investigación sea factible la misma se desarrolla de una manera organizada, a continuación, se detallan los recursos humanos, tecnológicos, materiales, económicos y demás insumos necesarios para garantizar un análisis confiable y viable en el proceso de descarbonización de una cámara de combustión en un motor a gasolina mediante el uso de oxihidrógeno.

Recursos Humanos

Los recursos humanos que fueron participes para el desarrollo del presente proyecto de titulación con tema “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA EN EL PROCESO DE DESCARBONIZACIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN UTILIZANDO UN EQUIPO GENERADOR DE OXIHIDRÓGENO.

Tabla 42

Recursos humanos

Orden	Descripción	Función
1	Pazmiño Dávila, Kevin Orlando	Investigador
2	Peralvo Mesías, Antonio Fabricio	Investigador
3	Quiroz Erazo, José Lizandro	Director del trabajo

Nota. En la Tabla 42 se detalla los participantes del proyecto.

Recursos Tecnológicos

Los recursos tecnológicos utilizados para el diseño y construcción del generador de oxihidrógeno y posteriormente el análisis del proceso de descarbonización de la cámara de combustión se detallan en la Tabla 43.

Tabla 43

Recursos tecnológicos

Orden	Descripción
1	Laptop HP
2	Internet
3	Cámara fotográfica
4	Manómetro
5	Analizador de gases
6	Multímetro automotriz
7	Software y aplicaciones
8	Máquinas herramientas

Nota. La Tabla 43 detalla los recursos tecnológicos utilizados para el presente trabajo de investigación.

Recursos Materiales

Los recursos materiales necesarios para el diseño y construcción del generador de oxihidrógeno y el análisis del proceso de descarbonización de la cámara de combustión se detallan a continuación.

Tabla 44*Recursos materiales*

Orden	Detalle	Cantidad
1	Acero inoxidable 316L2B 1mm	1
2	Neopreno de 2.5 mm	1
3	Lámina de acrílico 3 mm	1
4	Lámina de acrílico 6 mm	1
5	Pernos 3/16" x 1 1/2"	16
6	Pernos 1/8" x 1"	6
7	Manguera tubo poliuretano 8 mm	4
8	Adaptador manguera 8 mm	10
9	Racor reductor hembra 20-8 mm	2
10	Unión hembra PVC 1"	1
11	Tapón hembra PVC 1"	1
12	Terminales eléctricos	6
13	Módulo PWM 20A 9-125V	1
14	Conductor sólido 16 AWG	2
15	Conductor sólido 18 AWG	4
16	Tablero melanina 15 mm	1
17	Sensor electrónico de flujo 1lt – 30 lt	1
18	Pantallas LCD 16X2	2
19	Multímetro digital	1
20	Juego de brocas perforantes	1
21	Arduino Nano	2

Nota. En la Tabla 44 se detalla los insumos materiales utilizados en el proyecto.

Presupuesto

El presupuesto invertido en el presente trabajo de investigación tanto en el diseño y construcción del equipo generador de HHO, como en el análisis del proceso de descarbonización de la cámara de combustión se muestra en la siguiente Tabla 45.

Tabla 45

Presupuesto de la investigación

Detalle	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Acero inoxidable 316L2B 1mm	1	\$ 53.00	\$ 53.00
Neopreno de 2.5 mm	1	\$ 30.00	\$ 30.00
Lámina de acrílico 3 mm	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Lámina de acrílico 6 mm	1	\$40.00	\$40.00
Manguera tubo poliuretano 8 mm	4	\$ 3.00	\$ 12.00
Adaptador manguera 8 mm	10	\$ 1.50	\$ 15.00
Módulo PWM 20A 9-125V	1	\$ 30.00	\$ 30.00
Tablero melanina 15 mm	1	\$ 26.90	\$ 26.90
Sensor electrónico de flujo 1lt – 30 lt	1	\$ 16.00	\$ 16.00
Pantallas LCD 16X2	2	\$ 9.50	\$ 19.00
Multímetro digital	1	\$ 7.00	\$ 7.00
Juego de brocas perforantes	1	\$ 10.00	\$ 10.00
Arduino Nano	2	\$ 19.90	\$ 39.80
Insumos electrónicos		\$ 45.00	\$ 45.00
Insumos de ferretería		\$ 106.00	\$ 106.00
Compresómetro automotriz	1	\$ 81.00	\$ 81.00

Detalle	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Maquinas herramientas		\$ 325.00	\$ 325.00
Pruebas e insumos		\$ 200.00	\$ 200.00
SUMA TOTAL			\$1,075.70

Nota. En la Tabla 45 se detalla el presupuesto utilizado para la realización del presente proyecto.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó y construyó el equipo generador de *HHO* de celdas secas con 10 pares de electrodos, para descarbonizar motores de combustión interna a gasolina de hasta 3.0L de cilindrada, con un sistema automatizado relé-temporizador, sistema aviso lumínicos y sonoros y un panel de control de flujo de gas.
- Se ejecutó los protocolos de descarbonización en un motor a gasolina con una duración de 2 horas, con una relación de flujo de *HHO* de 0.5 lt/min por cada 1.000 cc de cilindrada.
- Se evaluó y comparó datos tomados en el MCI a gasolina con equipos y herramientas especializadas como lo son el videoscopio, compresómetro, analizador de gases y multímetro automotriz previa y posteriormente al proceso de descarbonización.
- El proceso de descarbonización del motor generó valores en los parámetros de emisiones de gases diferentes a los valores tomados previamente a su ejecución.
- Los resultados finales de los dos vehículos no fueron iguales, esto a causa de la diferencia en acumulación de carbonilla en su interior, cilindrada, kilometraje, modelo del motor y la eficiencia de los sistemas de alimentación de combustible.
- El proceso de descarbonización mediante el *HHO* es un procedimiento no invasivo que permite la limpieza de la cámara de combustión disminuyendo costos y tiempos de trabajo con relación a procesos invasivos de limpieza de motores.
- En el vehículo Great Wall H5 se evidenció que existe una disminución en las emisiones de HC de 16 ppm a 2 ppm y en el caso del CO₂ de 13.80% a un valor de 13.60%, y se

da un aumento en el CO y O₂ alcanzando valores de 0.07% y 0.58% respectivamente, llegando a valores que no exceden los requerimientos de la normativa NTE INEN 2204.

- Se pudo determinar que en el vehículo Chevrolet LUV las emisiones de escape de los gases de CO₂ y O₂ presentaron una disminución del 11.10% al 10.10% y del 3.26% al 2.77% respectivamente, en el caso de los HC las emisiones presentaron un aumento de 368 ppm a 539 ppm y al igual que el CO que varió de 1.68% a 2.37%.
- La presión de compresión en el motor del vehículo Great Wall H5, incrementó de 120 PSI a 130 PSI dando como resultado un incremento del 8,33% siendo este el valor con más variación de los 4 cilindros analizados y en el vehículo Chevrolet LUV no presentó cambios en la compresión, manteniéndose los valores iniciales de 110-120 PSI respectivamente en cada cilindro del motor.
- Mediante la fundamentación teórica se pudo conocer aspectos importantes sobre la generación *HHO* por electrólisis con el hidróxido de potasio como electrolito y el agua desmineralizada.
- Se obtuvo una reducción en el consumo de combustible en una ruta de 32,7km a una velocidad media de 45,7 km/h del 2,60% en el vehículo Great Wall H5 2015, y un aumento de consumo del 8,51% en la Chevrolet LUV 1994, estos valores fueron obtenidos aplicando el protocolo WLTP para pruebas de consumo de combustible.

Recomendaciones

- Utilizar el equipo descarbonizador de *HHO* para MCI a gasolina con un límite máximo de 3.0L de cilindrada, debido a la cantidad máxima de producción de HHO del equipo de hasta 1.5 lt/min aproximadamente.
- Revisar el nivel del electrolito en el depósito, teniendo como referencia los indicadores de nivel del recipiente.

- Es recomendable para las pruebas y análisis de los parámetros característicos del motor, basarse en la ficha técnica, normas y protocolos vigentes, como es el protocolo WLTP para las pruebas de consumo y la norma NTE INEN 2204 para análisis de gases contaminantes.
- Considerar el estado de los filtros y accesorios del analizador de gases, además de su limpieza para obtener los datos requeridos de una manera precisa.
- Al realizar el encendido del analizador de emisiones de gases, se debe mantener el equipo a una distancia de 4 metros del tubo de escape para no alterar la próxima lectura.
- Previo a las pruebas de emisiones de gases, es importante el estudio de protocolos y normas que establecen los valores límites en el país.

Bibliografía

- Acrylic Reams. (2022). Obtenido de <https://acrylicdreams.mx/que-es-el-acrilico/#:~:text=El%20Acr%C3%ADlico%20es%20el%20pol%C3%ADmero,producir%20una%20l%C3%A1mina%20completamente%20transparente.>
- Actualidad Motor. (2022). Obtenido de <https://www.actualidadmotor.com/carburador/>
- Alonso, M., & Acosta, V. (1984). *Introducción a la Física*. Bogota: Cultural Colombiana Ltda.
- Amazon. (2022). Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.amazon.com%2F%2Fes%2FControlador-velocidad-controlador-regulador-intensidad%2Fdp%2FB086XJ3PDC&psig=AOvVaw3LdfzJWL_VNVfpC0IZABDI&ust=1666543020867000&source=images&cd=vfe&ved=0CA4QjhxqFwoTCIDe0bei9PoCF
- Ambientum. (2022). *Características de la gasolina*. Obtenido de https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/los_biocarburantes.asp
- Arduinove. (2022). Obtenido de http://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product_id=542
- AS S.L.U. (19 de 10 de 2022). *AS Fabricantes de catalizadores y filtros de partículas*. Obtenido de https://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf
- Auto México. (2022). Obtenido de <https://www.software-transporte.com/wp-content/uploads/2021/01/partes-y-funciones-de-la-celda.png>
- AutoDaewooSpark. (2022). Obtenido de <https://www.autodaewoospark.com/medicion-compresion-cilindros-motor.php>
- Autonoción. (2022). Obtenido de <https://www.autonocion.com/inyeccion-motores-gasolina/>
- Better Fuel Technology. (2022). *betterfuel*. Obtenido de <https://www.hho-1.com/datos-hidrogeno-hho/?lang=es>

- Betterfuel. (2022). Obtenido de <https://www.hho-1.com/datos-hidrogeno-hho/?lang=es>
- BOSCH. (1999). *Sistema de inyección de gasolina K-Jetronic*.
- Carrera Escobedo, J. L., Riesco Ávila, J. M., Rangel Hernández, V. H., & Ramírez Barrón, A. (2009). Estudio numérico de la reducción simultánea de NOx y Hollín en un motor diesel. *Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- Catálogo IPAC 2019. (2019). Obtenido de http://www.ipac-acero.com/revista-digital/CatalogoIPAC_2019.pdf
- Cerecero, M. Á. (2013). *Diseño de un Dinamómetro de Chasis*. México D.F.: UNAM.
- Choi, B., Panthi, D., Nakoji, M., Kabutomori, T., Tsutsumi, K., & Tsutsumi, A. (2015). Novel hydrogen production and power generation system using metal hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 6197-6206.
- Control Automatico Educación. (2022). Obtenido de <https://controlautomaticoeducacion.com/microcontroladores-pic/pwm-modulacion-por-ancho-de-pulso/>
- Coro, N., & Escobar, D. (2017). *Método electroquímico para la obtención de gas de Brown*. Quito.
- Díaz Rey, Á. O., González Gil, J. E., & González Estrada, O. A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 143-154.
- Dipac. (2010). *Catálogo de Acero*.
- Ecostandar. (2022). Obtenido de <https://ecostandard.cl/nitrato-de-amonio-uso-fertilizante-y-explosivo-anfo/#:~:text=El%20nitrato%20de%20amonio%20es%20un%20material%20s%C3%B3lido%20fuertemente%20oxidante,explosivos%20industriales%20del%20tipo%20ANFO.>
- Fábrega Ramos, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6533>.

- Fenixobd. (2022). Obtenido de <https://fenixobd.com/producto/analizador-de-gases-neomotec-cg450-koreano-100-original/>
- González, J. E. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 143-154.
- Gutiérrez Jodra, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 49-67.
- HerramientaMundo. (2022). Obtenido de <https://www.mundoherramienta.net/herramienta-electrica/endoscopio-movil/>
- HHO Carbon Cleaner. (2022). Obtenido de <http://www.hhocarboncleaner.cl/img/foto-43.jpg>
- HHO Ibérica. (19 de 10 de 2022). *HHO IBÉRICA*. Obtenido de <https://hhoiberica.com/descarbonizacion/#:~:text=Descarbonizaci%C3%B3n%20con%20Oxihidr%C3%B3geno&text=El%20alto%20poder%20calor%C3%ADfico%20del,en%20menos%20de%20una%20hora.>
- Infotaller. (12 de 01 de 2022). *Infotaller*. Obtenido de https://www.infotaller.tv/electromecanica/Gases-analizarlos-ITV-conocervehiculo_0_1539746045.html
- Iñiguez Izquierdo, J. F., Reyes Campaña, G. G., Rivera Rivera, C. A., & Vera Orbe, E. S. (2017). Estudio De Emisiones Contaminantes Producidas Por Un Motor Otto Con El Uso De Gasolina Y Un Combustible A Base De 95% De Gasolina Y 5% De Etanol. *INNOVA Research Journal*, 11-18.
- La Guía. (2010). Obtenido de <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>
- Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lopez, M. (2021). *Tecverde*. Obtenido de Armado de Celda Húmeda: <http://tecverde.mex.tl/imagesnew2/0/0/0/1/1/9/9/2/2/9/C%20dry.png>

- Lubricantes en Venezuela. (2022). Obtenido de <https://www.lubricantesenvenezuela.com/multimetro-automotriz/>
- MetalisteriaV3. (2022). Obtenido de <https://www.metalisteriav3.es/acero-inoxidable-304-caracteristicas-propiedades/>
- Motorgiga. (13 de 01 de 2022). *Asiento de valvula*. Obtenido de <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/asiento-de-valvula-definicionsignificado/>
- Mundo del motor. (12 de 01 de 2022). *Válvulas de admisión y escape*. Obtenido de <https://www.mundodelmotor.net/valvulas-de-admision-y-escape/>
- Naylampmechatronics. (2022). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html#:~:text=El%20sensor%20de%20flujo%20de,caudal%C3%ADmetro%20electr%C3%B3nico%20de%20tipo%20turbina.>
- Norma NTE INEN 2 204 Gestión Ambiental. (01 de 2017). Obtenido de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2204-2.pdf
- Ortmann. (2005). *Técnica de los gases de escape para motores de gasolina*.
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Universitat Politècnica de Valencia.
- Registro Federal Administración Nacional de Archivos y Registros. (2010). *Código Federal de Regulaciones*.
- Revista Científica y Tecnológica UPSE. (2018). Obtenido de <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/287/396>
- Revista Científica y Tecnológica UPSE. (2018). Obtenido de <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/287/396>
- Reyes, G. G., Iñiguez, J. E., Pupiales, W. E., Soria, C. A., & Yépez, J. E. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible

en un motor de combustión interna a 2800 m.s.n.m. *Revista Científica y Tecnológica UPSE* , 19-28.

Rivera Guzmán, E. (2015). Celda seca electrolítica para la obtención de hidrogeno con aguas residuales de la empresa Muebles León. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato.

Rovira, A., & Muñoz, M. (2015). *Motores de Combustión Interna*. Madrid: UNED.

Software Transporte. (2021). Obtenido de <https://www.software-transporte.com/wp-content/uploads/2021/01/partes-y-funciones-de-la-celda.png>

Tipanluisa , L., Remache , A., Ayabaca , C., & Reina , S. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *SciELO Analytics*.

UPSE, R. C. (2018). Obtenido de <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/287/396>

Xunta. (2022). Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contenido/42_metales_ferrosos.html

Anexos