



Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc Opel para determinar su influencia de los parámetros característicos

Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paul y Masapanta Alomoto, Marco Eduardo

Departamento de Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

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

Ing. Erazo Laverde, Washington Germán

08 de agosto 2022

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Aimacaña_Masapanta_Erazo_Implementación de un generador...

Scanned on: 14:38 August 8, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	2124
Words with Minor Changes	879
Paraphrased Words	729
Omitted Words	0

A blue handwritten signature and a circular official seal of the institution.

Firmado digitalmente
por WASHINGTON
GERMAN ERAZO
LAVERDE
Fecha: 2022.08.08
10:41:19 -05'00'



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc Opel para determinar su influencia de los parámetros característicos”** fue realizado por los señores, ***Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paul y Masapanta Alomoto, Marco Eduardo***; 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, 08 agosto del 2022

Firma:

 Firmado digitalmente
por WASHINGTON
GERMAN ERAZO
LAVERDE
Fecha: 2022.08.08
09:34:51 -05'00'

Ing. Erazo Laverde, Washington Germán

C.C: 0501432637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Responsabilidad de autoría

Nosotros, **Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paúl y Masapanta Alomoto, Marco Eduardo**, con cédulas de ciudadanía N° 0503736043 y N° 0502880602, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc Opel para determinar su influencia de los parámetros característicos"** 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, 08 de agosto del 2022

Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paúl

C.C.: 0503736043

Masapanta Alomoto, Marco Eduardo

C.C.: 0502880602



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de publicación

Nosotros **Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paúl y Masapanta Alomoto, Marco Eduardo** con cédulas de ciudadanía N° 0503736043 y N° 0502880602, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *"Implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna 1800 cc Opel para determinar su influencia de los parámetros característicos"* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 08 de agosto del 2022

Aimacaña Caisaluisa, Darwin Paúl

C.C.: 0503736043

Masapanta Alomoto, Marco Eduardo

C.C.: 0502880602

Dedicatoria

Este proyecto quiero dedicar a Dios, por la maravillosa oportunidad en la vida, por ser pilar de los valores humanos, por permitirme vivir experiencias y aprender de ellas, conocer personas, profesores, compañeros y amigos, de los cuales muchos seguiremos compartiendo el curso de nuestras vidas.

A mis padres Luis Humberto Aimacaña y Blanca Janeth Caisaluisa que siempre me brindaron su apoyo en cada una de mis metas y batallas, quienes fueron mi base económica, motivacional y sobre todo la razón por quien seguir alcanzando sueños en esta vida.

A mis hermanos Soledad, Natalia y Fernando por apoyarnos y avanzar en la vida juntos y tomados de las manos, y compartir este deseo intenso de cumplir metas y trayectos para honrar a Dios y a nuestra familia.

Agradezco a todos los amigos y conocidos quienes decidieron brindarme su amistad y confianza.

Darwin Aimacaña

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis Padres Marco y Rosa quienes en todo este trayecto me han ayudado a superarme día a día, me han inculcado valores y me han enseñado a valorar cada momento para formarme como persona.

A los que ya no están aquí, pero los llevo presente en mi corazón porque que en memoria de ellos me he fortalecido con sus buenos recuerdos y sé que hubieran estado orgullosos de este pequeño triunfo, así como los otros momentos compartidos.

Marco Masapanta

Agradecimiento

Agradezco a Dios por permitirme culminar la carrera de ingeniería automotriz con salud y una sonrisa en mi rostro, a mis padres por brindarme gran parte de su juventud en mi formación como profesional y como ser humano, a toda mi familia por brindarme su apoyo, ánimos y consejos para un buen porvenir.

A mis profesores por su paciencia a la hora de brindarnos sus conocimientos, por mostrarnos su sensibilidad y señalar que frente a toda situación y actitud primero esta el hecho de ser un buen ser humano.

Agradezco a todos mis compañeros con quienes compartimos años en nuestro segundo hogar, supimos conllevar momentos llenos de alegría, suspenso, miedo, intriga y demás, con quienes llegamos a la meta a pesar de cualquiera adversidad.

Darwin Aimacaña

Agradecimiento

Agradezco con profundo amor y respeto a mis Padres Marco y Rosa por su apoyo incondicional en este trayecto universitario y el tiempo dedicado para poder superarme.

A mis hermanos Darwin, Angela y Salomé, y mi Tío Fausto que sin importar las dificultades seguimos unidos, trabajando día a día y apoyándonos incondicionalmente.

Agradezco a mis docentes que me han inculcado los conocimientos necesarios durante este periodo universitario para saber que todo el esfuerzo entregado en campo automotriz ahora es mi pasión y felicidad.

A mis amigos de este trayecto universitario, que supieron darme su apoyo, que compartieron mis valores y me brindaron los ánimos que necesite para no rendirme en mis estudios porque el modo guerra es ahora nuestro lema.

Marco Masapanta

ÍNDICE 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 contenidos	10
Índice de figuras	16
Índice de Tablas	18
Índice de ecuaciones.....	20
Resumen.....	21
Abstract	22
Capítulo I: Planteamiento del Problema de Investigación	23
Antecedentes.....	23
Planteamiento del problema.....	24
Descripción resumida del proyecto	25
Justificación e importancia	26
Objetivos.....	26
<i>Objetivo General</i>	26
<i>Objetivos específicos</i>	27

Metas del proyecto	27
Hipótesis	28
Variables de investigación.....	28
Variable Independiente	28
Variable dependiente	29
Metodología de desarrollo del proyecto	30
<i>Método inductivo</i>	30
<i>Método deductivo</i>	31
<i>Método de campo</i>	31
<i>Método Experimental</i>	31
<i>Método de medición</i>	31
<i>Método comparativo</i>	32
<i>Método de matematización</i>	32
Capítulo II: Marco teórico	37
Descripción general de los motores OTTO	37
Par motor	38
<i>Potencia</i>	40
<i>Consumo de combustible</i>	41
<i>Rendimientos: Térmico, mecánico y efectivo</i>	42
<i>Formación de la mezcla</i>	46
Reducción de emisiones de gases producto de la combustión	51

<i>Dióxido de carbono CO₂</i>	51
<i>Monóxido de carbono CO</i>	51
<i>Hidrocarburos no combustionados HC</i>	51
<i>Óxido de nitrógeno NOX</i>	52
El hidrógeno	53
Aplicaciones del hidrógeno en la industria automotriz	54
<i>Hidrógeno como pila de combustible</i>	54
<i>Hidrógeno como carburante adicional</i>	55
Propiedades del hidrógeno	55
Obtención del hidrógeno	56
<i>Electrólisis del agua</i>	56
<i>Reformado de hidrocarburos</i>	57
<i>A partir de energía solar</i>	58
Formas de almacenamiento del hidrógeno	58
Sistema de generación de hidrógeno de celda seca	59
<i>Reactor de hidrógeno de celda seca</i>	59
<i>Celdas electrolizadoras secas del generador</i>	59
<i>Mangueras</i>	60
<i>Depósito o burbujeador</i>	60
<i>Relé</i>	61
<i>Cables eléctricos y conectores</i>	61

<i>Sustancias y reactivos</i>	61
<i>Agua destilada</i>	61
<i>Hidróxido de Potasio</i>	62
Funcionamiento del sistema de generación de hidrógeno	62
<i>Diagrama de funcionamiento</i>	63
<i>Sistema eléctrico</i>	64
Parámetros matemáticos para la generación de hidrógeno	65
<i>Ley de Faraday</i>	65
<i>Potencia eléctrica</i>	66
Capítulo III: Instalación del sistema de generación de hidrógeno de celda seca	67
Características del motor de combustión interna OPEL 1.8 L	67
Características del generador de hidrógeno de celda seca	68
Seguridad y precauciones de instalación del reactor de hidrógeno de celda seca	70
Instalación del reactor	71
<i>Pasos para la conexión mecánica del sistema</i>	71
<i>Pasos la conexión eléctrica del sistema</i>	75
<i>Preparación de la mezcla de agua destilada y el hidróxido de potasio del reactor</i>	78
Matematización de la producción del HHO	79
<i>Proceso de Producción de hidrógeno</i>	80
<i>Estimación del área de placas</i>	81
<i>Estimación del flujo de gas HHO</i>	82

Puesta punto del sistema	84
Mantenimiento del sistema de generación de hidrógeno.....	85
Capítulo IV: Pruebas y análisis de resultados de los parámetros característicos de desempeño.....	86
Equipos de Prueba.....	86
<i>Dinamómetro Automotriz</i>	86
<i>Analizador de gases</i>	87
<i>Multímetro automotriz</i>	88
Pruebas de generación de hidrógeno.....	89
Pruebas de desempeño del motor con el dinamómetro.....	91
<i>Resultados de desempeño con gasolina extra</i>	94
<i>Resultados de desempeño con gasolina extra y HHO</i>	97
<i>Análisis y relación potencia con combustible extra vs extra + HHO</i>	101
<i>Análisis y relación torque con combustible extra vs extra + HHO</i>	102
<i>Resultados de desempeño con gasolina super</i>	104
<i>Resultados de desempeño con gasolina super + HHO</i>	107
<i>Análisis y relación de potencia combustible super vs gasolina super + HHO</i>	109
<i>Análisis y relación de torque con combustible super vs gasolina super + HHO</i>	111
Prueba de consumo de combustible	112
<i>Resultados y análisis con combustible extra vs extra + HHO</i>	115

<i>Resultados y análisis con combustible super vs super + HHO</i>	116
Pruebas de emisiones del motor con el analizador de gases	117
<i>Prueba de emisiones con combustible extra</i>	118
<i>Prueba de emisiones con combustible extra y HHO</i>	119
<i>Relación y análisis de emisiones con combustible extra vs extra + HHO</i>	120
<i>Pruebas de emisiones con combustible super</i>	121
<i>Pruebas de emisiones con combustible super y HHO</i>	122
<i>Relación y análisis de emisiones con combustible super vs super + HHO</i>	123
Matematización de los parámetros térmicos y mecánicos del motor de combustión interna con gasolina Extra, Súper y su combinación de HHO	124
Capítulo V: Marco administrativo	128
Recursos	128
<i>Recursos Humanos</i>	128
<i>Recursos Tecnológicos</i>	128
<i>Recursos materiales</i>	129
Presupuesto.....	130
Financiamiento	132
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	133
Conclusiones.....	133
Recomendaciones.....	135
Bibliografía	136
Anexos.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	24
Figura 2 <i>Esquema Simplificado del Circuito de Aire, Escape y Combustible de un Motor de Gasolina</i>	37
Figura 3 <i>Esquema para la obtención del par motor</i>	39
Figura 4 <i>Diferencia Entre el Diagrama Real y el Teórico</i>	43
Figura 5 <i>Concentración de Emisiones Contaminantes en el MEP en función del dosado relativo</i>	53
Figura 6 <i>Funcionamiento del hidrógeno como pila de combustible</i>	55
Figura 7 <i>Separación del hidrógeno y oxígeno por medio de la electrólisis</i>	57
Figura 8 <i>Producción de hidrógeno a partir de energía solar</i>	58
Figura 9 <i>Funcionamiento del sistema de generación de hidrógeno de celda seca</i>	64
Figura 10 <i>Diagrama eléctrico del sistema de generación de HHO</i>	65
Figura 11 <i>Reactor de hidrógeno de celda seca</i>	71
Figura 12 <i>Depósito del electrolito</i>	72
Figura 13 <i>Ductos del reactor</i>	73
Figura 14 <i>Trampa de agua</i>	73
Figura 15 <i>Filtro de HHO</i>	74
Figura 16 <i>Acople hacia la toma de vacío</i>	74
Figura 17 <i>Conexión Batería</i>	75
Figura 18 <i>Conexión de relevador</i>	76
Figura 19 <i>Portafusibles expansor</i>	76
Figura 20 <i>Duplicado de señal encendedor</i>	77
Figura 21 <i>Bornes del reactor</i>	77
Figura 22 <i>Diagrama eléctrico</i>	78

Figura 23 <i>Electrolito del sistema generador de hidrógeno.</i>	79
Figura 24 <i>Proceso de producción de hidrógeno del sistema</i>	80
Figura 25 <i>Dimensiones de la placa del generador.</i>	81
Figura 26 <i>Dinamómetro de rodillos MOTORROLL (MD200HP)</i>	87
Figura 27 <i>Analizador de gases CARTEK.</i>	88
Figura 28 <i>Posición del reactor de hidrógeno.</i>	90
Figura 29 <i>Ducto salida primaria de hidrógeno</i>	90
Figura 30 <i>Solución jabonosa</i>	91
Figura 31 <i>Detonación del gas HHO.</i>	91
Figura 32 <i>Gráfica potencia y torque con gasolina extra.</i>	95
Figura 33 <i>Gráfica de potencia y torque con gasolina extra + HHO.</i>	98
Figura 34 <i>Relación de potencia gasolina extra vs gasolina extra + HHO.</i>	101
Figura 35 <i>Relación de torque gasolina extra vs gasolina extra + HHO.</i>	102
Figura 36 <i>Gráfica de potencia y torque con gasolina super.</i>	104
Figura 37 <i>Gráfica de potencia y torque con gasolina super + HHO.</i>	107
Figura 38 <i>Relación de potencia de combustible super vs super + HHO.</i>	110
Figura 39 <i>Relación de torque con combustible super vs super + HHO.</i>	111
Figura 40 <i>Ruta para el análisis de consumo de combustible.</i>	114
Figura 41 <i>Análisis de consumo de combustible extra vs extra + HHO.</i>	115
Figura 42 <i>Análisis de consumo de combustible super vs super + HHO.</i>	117
Figura 43 <i>Prueba de emisiones contaminantes en el vehículo Opel Corsa 1.8L</i>	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente	28
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente	29
Tabla 3 Metodología de la investigación.....	32
Tabla 4 Magnitudes de la unidad didáctica	41
Tabla 5 Ficha técnica Vehículo OPEL CORSA 1.8 L.....	67
Tabla 6 Ficha técnica del generador de hidrógeno de celda seca.....	69
Tabla 7 Accesorios del generador de hidrógeno de celda seca.	69
Tabla 8 Características del generador de hidrógeno.....	79
Tabla 9 Resumen de la matematización de producción de hidrógeno.	84
Tabla 10 Especificaciones técnicas del dinamómetro de rodillos Motorroll Md200hp.....	86
Tabla 11 Especificaciones de precisión del multímetro automotriz.	88
Tabla 12 Puesta a punto del dinamómetro.	92
Tabla 13 Valores de potencia y torque con la utilización de gasolina extra.....	96
Tabla 14 Valores de potencia y torque con la utilización de gasolina extra + HHO.....	99
Tabla 15 Variación porcentual de potencia (hp) con gasolina extra + HHO.	102
Tabla 16 Variación porcentual de torque con gasolina extra + HHO.....	103
Tabla 17 Valores de potencia y torque con gasolina super.....	105
Tabla 18 Valores de potencia y torque con gasolina super + HHO.....	108
Tabla 19 Variación porcentual de potencia hp con combustible super + HHO.....	110
Tabla 20 Variación porcentual de torque Kg-m con combustible super + HHO.....	112
Tabla 21 Protocolo WLTP para consumo de combustible.....	113
Tabla 22 Datos de prueba de ruta con combustible extra vs extra + HHO.....	115
Tabla 23 Datos de prueba de ruta de combustible super vs super + HHO.....	116
Tabla 24 Prueba de emisiones de gases con gasolina extra.	118

Tabla 25 <i>Prueba de emisiones de gases con gasolina extra y HHO (NTE INEN 2204)</i>	119
Tabla 26 <i>Variación de emisiones contaminantes con combustible extra vs extra + HHO</i>	121
Tabla 27 <i>Prueba de emisiones de gases con gasolina super.</i>	122
Tabla 28 <i>Resultados de la prueba de emisiones de gases con gasolina super y HHO</i>	123
Tabla 29 <i>Variación de emisiones contaminantes con combustible super vs super + HHO</i>	124
Tabla 30 <i>Recursos humanos</i>	128
Tabla 31 <i>Recurso tecnológicos</i>	129
Tabla 32 <i>Recursos materiales</i>	129

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Fórmula de torque del motor</i>	39
Ecuación 2 <i>Fórmula de la potencia mecánica</i>	40
Ecuación 3 <i>Consumo Específico de combustible</i>	42
Ecuación 4 <i>Calor suministrado</i>	44
Ecuación 5 <i>Calor extraído</i>	44
Ecuación 6 <i>Trabajo del ciclo</i>	45
Ecuación 7 <i>Eficiencia térmica</i>	45
Ecuación 8 <i>Temperatura de compresión</i>	45
Ecuación 9 <i>Temperatura de combustión</i>	45
Ecuación 10 <i>Temperatura de expansión</i>	46
Ecuación 11 <i>Presión media del ciclo</i>	46
Ecuación 12 <i>Coeficiente de exceso de aire</i>	46
Ecuación 13 <i>Cantidad máxima en masa de aire</i>	47
Ecuación 14 <i>Densidad del aire al final de admisión</i>	47
Ecuación 15 <i>Masa de la carga en admisión</i>	47
Ecuación 16 <i>Temperatura de la carga al finalizar el llenado</i>	48
Ecuación 17 <i>Densidad de la carga al terminar admisión</i>	48
Ecuación 18 <i>Coeficiente de gases residuales</i>	48
Ecuación 19 <i>Temperatura al final de la admisión</i>	49
Ecuación 20 <i>Cantidad de calor que aporta la carga fresca tomando en cuenta el calentamiento de las paredes del cilindro</i>	49
Ecuación 21 <i>Cantidad de calor que conservan los gases residuales</i>	50
Ecuación 22 <i>Cantidad de carga fresca que podría entrar al cilindro</i>	50
Ecuación 23 <i>Ley de Faraday</i>	66

Resumen

El presente trabajo de investigación se basó en la implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en el motor Opel Corsa de 1.8 L, donde se mencionan las características y operación del sistema para la producción de HHO como carburante adicional a la mezcla aire – combustible, el cual mejora los parámetros característicos del motor como son el incremento de torque y potencia, optimización del combustible y reducción de los gases contaminantes generados por este. Para instalar el generador de hidrógeno de celda seca se seleccionó los elementos eléctricos y mecánicos; se mencionó los pasos a seguir en la instalación, el mantenimiento del sistema, las precauciones a tomar en cuenta y la puesta a punto de este. El ingreso del hidrógeno al motor se da por el múltiple de admisión, donde el generador utiliza el proceso de electrólisis para separar las moléculas de hidrógeno del oxígeno y formar HHO. Con la matematización de esos valores se estimó el ingreso de HHO al motor de 340.2 ml/min. Una vez instalado el sistema se procedió a realizar la prueba de desempeño del motor con el dinamómetro automotriz, en donde el torque y la potencia a 5500 rpm se incrementaron hasta en un 6% con la utilización de gasolina extra + HHO y hasta en un 3% con gasolina super + HHO. Además, se realizó las pruebas de emisiones contaminantes aplicando la norma INEN NTE 2204 con un analizador de gases, en el cual el monóxido de carbono CO tuvo una reducción de hasta 12% al usar HHO con gasolina extra y super respectivamente. Los demás gases como el HC, CO₂ y O₂ no tuvieron reducciones considerables, aprobando la normativa en ambos casos. La prueba de consumo se aplicó con el protocolo WLTP, en donde se optimizó el uso combustible hasta en un 15% con gasolina extra y super.

Palabras Clave: HHO, electrólisis, carburante adicional, emisiones contaminantes, optimización de combustible.

Abstract

This research work was based on the implementation of a dry cell hydrogen generator in the Opel Corsa 1.8 L engine, where the characteristics and operation of the system for the production of HHO as additional fuel to the air-fuel mixture are mentioned, which improves the characteristic parameters of the engine such as increased torque and power, fuel optimization and reduction of polluting gases generated by it. To install the dry cell hydrogen generator, the electrical and mechanical elements were selected; the steps to follow in the installation, the maintenance of the system, the precautions to take into account and the tuning of the system were mentioned. The hydrogen enters the engine through the intake manifold, where the generator uses the electrolysis process to separate the hydrogen molecules from the oxygen and form HHO. By mathematizing these values, the HHO input to the engine was estimated at 340.2 ml/min. Once the system was installed, the engine performance test was carried out with the automotive dynamometer, where the torque and power at 5500 rpm increased up to 6% with the use of extra gasoline + HHO and up to 3% with super gasoline + HHO. In addition, contaminant emissions tests were carried out applying INEN NTE 2204 with a gas analyzer, in which carbon monoxide CO had a reduction of up to 12% when using HHO with extra and super gasoline, respectively. The other gases such as HC, CO₂ and O₂ did not have considerable reductions, passing the standard in both cases. The fuel consumption test was applied with the WLTP protocol, where fuel use was optimized up to 15% with extra and super gasoline.

Key words: HHO, electrolysis, additional fuel, pollutant emissions, fuel optimization.

Capítulo I

Planteamiento del Problema de Investigación

Antecedentes

El hidrógeno es un gas que está presente en abundancia en el universo, por ende, mediante procesos fisicoquímicos y biológicos se encuentra también en la tierra, combinado mayormente con el oxígeno para formar agua. De ello se destacan propiedades como su bajo punto de ebullición y su baja densidad, deduciendo que este elemento es difícil de almacenar. Sin embargo, mediante reacciones químicas (electrólisis), se logra separar los átomos de hidrógeno "H" del agua, en donde el 50% del hidrógeno producido se utiliza en la fabricación de amoníaco, 37% en las refinerías de petróleo, el 8% en la obtención de metanol, 4% en otros productos químicos y simplemente el 1% en diversas aplicaciones. Anualmente toda la producción generada se eleva a unos 60 millones de toneladas (Gutiérrez, 2005).

Una de las aplicaciones por las que se genera hidrógeno, se centra en el funcionamiento de un sistema Gasolina-HHO en un motor de combustión interna. El gas HHO, generado por electrólisis, es suministrado directamente al sistema de alimentación del motor, de modo que se combina con la mezcla aire combustible, teniendo como resultado un carburante adicional a la gasolina. Desarrollándose un sistema que es eficiente sin tener alteraciones para el correcto funcionamiento del motor (Juma & Martínez, 2015)

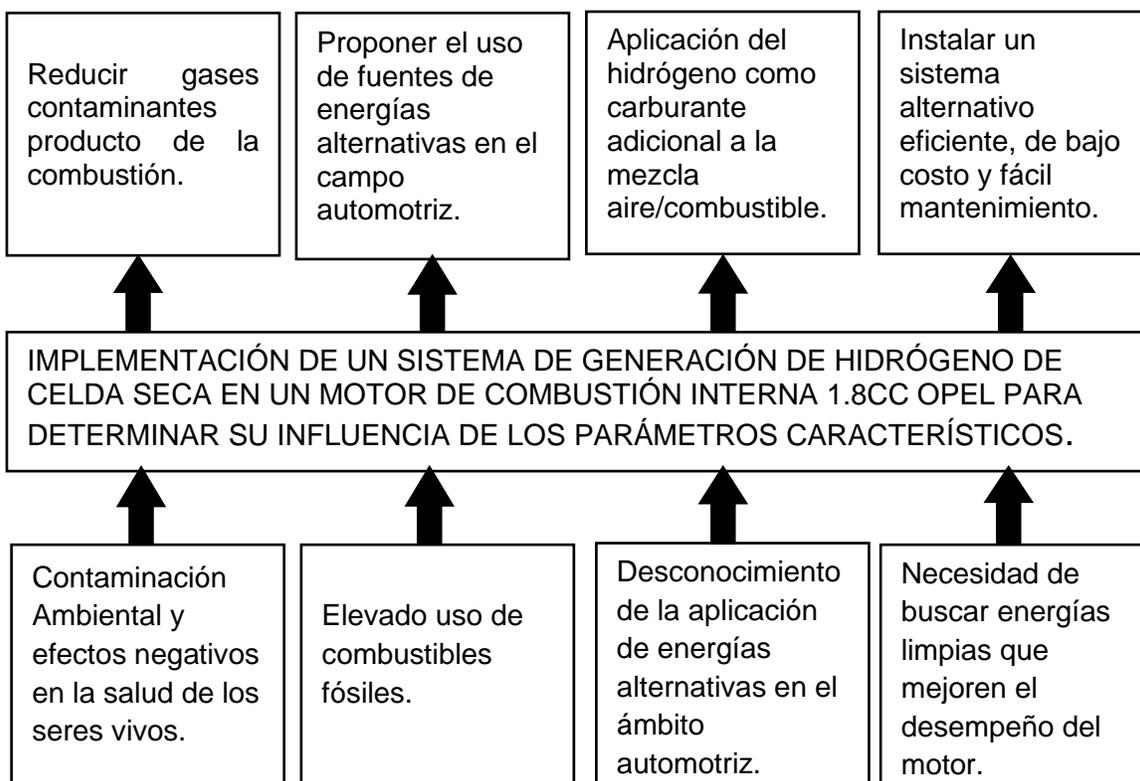
Ahora bien, la búsqueda de fuentes de energías alternativas que reemplacen a los combustibles fósiles en los vehículos y las consecuencias de usar combustibles fósiles, indica resultados en el Ecuador de las emisiones de dióxido de carbono consecuencia de la quema de combustibles fósiles ha alcanzado las 2.3 toneladas métricas per cápita en el año 2019, constituyéndose en uno de los principales problemas de contaminación (Grupo Banco Mundial [GBM], 2022). Y a partir del año 2020 el subsidio de los combustibles se liberó en el país, generando un alto costo de vida en los usuarios de vehículos automotores. Por ello, existe el

interés de buscar fuentes de energías alternativas como la generación del hidrógeno para constituir un elemento adicional a los hidrocarburos.

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas de la investigación

A través de la investigación se desea utilizar energías alternativas amigables con el medio ambiente, que permitan reducir los niveles de contaminación, limitar el uso de combustibles fósiles, mejorar los parámetros característicos del motor e incentivar el conocimiento de los beneficios del hidrógeno como combustible alternativo. Por tal motivo, el tema a investigar es la implementación de un sistema de generación de hidrógeno de celda

seca, en donde el hidrógeno es un carburante adicional a la mezcla aire /combustible, de fácil instalación y mantenimiento.

Descripción resumida del proyecto

En la investigación se utilizaron fuentes de información sobre el hidrógeno como combustible alternativo, mediante temas relacionados con el proyecto como: artículos científicos, libros, investigaciones científicas, páginas de internet.

Se determinó la constitución y operación del sistema de generación de hidrógeno de celda seca para aplicaciones en el motor de combustión interna.

Se tomó el estudio de los parámetros característicos del rendimiento del motor como: torque, potencia, consumo de combustible y gases producto de la combustión del motor Opel 1800cc, antes de la implementación del generador de hidrógeno.

Se seleccionó el generador de hidrógeno tipo celda seca, de acuerdo con parámetros como: disponibilidad, cilindrada, costo, facilidad de instalación, período de mantenimiento, ergonomía y riesgos.

Se seleccionó los elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos para implementar el sistema de generación de hidrógeno en un motor de combustión interna.

Se instaló el sistema de generación de hidrogeno de celda seca en el motor Opel 1.8 L.

Se obtuvo los parámetros de rendimiento del motor como: torque, potencia, consumo de combustible y gases producto de la combustión del motor Opel con el funcionamiento del generador de hidrógeno de celda seca

Se analizó los parámetros característicos de torque, potencia, gases contaminantes y consumo de combustible obtenidos bajos las dos condiciones de prueba que determinen la factibilidad del uso del HHO.

Justificación e importancia

El sector automotriz ha ido en auge en los últimos años y ello ha conllevado a que el combustible que mueve a los vehículos sea de mayor demanda a nivel mundial, promoviendo el uso excesivo del petróleo que es la materia prima de los combustibles y que finalmente el precio de estos se eleve.

Ahora bien, aquello no ha impedido el crecimiento del parque automotor como en el Ecuador donde el número de vehículos matriculados llegó a 2.4 millones de unidades al 2018 (INEC), representando un crecimiento anual del 1.4% respecto al año anterior (El Comercio, 2019). Conllevando al incremento de los gases contaminantes, que representan el 13.5% a nivel mundial por transporte terrestre, afectando a la salud del ser humano y perjudicando al medio ambiente (El Telégrafo, 2018).

Por ello, es importante buscar energías alternativas como la aplicación del HHO en motores de combustión interna como carburante adicional, mostrándose como una opción viable que reduce los gases contaminantes generados por los vehículos hacia el medio ambiente. Debido a que el poder calorífico del hidrógeno es mayor al de la gasolina, esto lo convierte en un combustible más eficiente y limpio ya que el producto de la combustión de este es el vapor de agua (Reyes et al., 2018).

Objetivos

Objetivo General

- Implementar el sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el MCI 1.8L OPEL para determinar la influencia en sus parámetros característicos de desempeño

Objetivos específicos

- Investigar en fuentes bibliográficas y casos referentes la implementación de los generadores de hidrógeno de celdas secas en los automóviles.
- Determinar los parámetros característicos del motor de combustión interna Opel 1800cc en condiciones normales de operación.
- Seleccionar los componentes mecánicos y electrónicos relacionados con el generador de hidrógeno de pila seca, mediante especificaciones y normas de seguridad.
- Realizar la puesta a punto del sistema de generación de hidrógeno en el motor de combustión interna Opel 1800 CC.
- Determinar los parámetros característicos del MCI 1.8L, una vez implementado el sistema de generación de hidrógeno por pila seca en el vehículo.
- Realizar un análisis comparativo de los parámetros característicos de desempeño del MCI entre el uso de combustible tradicional frente a la inyección de hidrógeno.
- Analizar la factibilidad de la implementación del sistema de generación de hidrógeno tipo celda seca.

Metas del proyecto

- Incrementar la potencia del motor OPEL 1.8 L, en un 6 % mediante la implementación de un generador de hidrógeno.
- Disminuir los gases residuales y mejorar la rentabilidad del consumo de combustible en un 15% de un auto convencional a gasolina al utilizar el HHO como carburante adicional.

Hipótesis

La implementación de un sistema de generación de hidrógeno tipo celda seca en un MCI 1.8L OPEL aportará una mejora en la potencia, reducción de emisiones contaminantes y un menor consumo de combustible (gasolina).

Variables de investigación

Variable Independiente

Sistema de generación de hidrógeno de celda seca

Tabla 1

Operacionalización de la variable independiente

Concepto	Categoría	Indicadores	ítem	Técnicas	Instrumentos
Es un sistema que transforma el agua a partir de energía eléctrica, separando el hidrógeno del oxígeno, conocida como electrólisis.	Tecnológica	Placas del generador	---	De Campo	Protocolo de prueba
		Capacidad del depósito	I	Medición	Protocolo de prueba
		Intensidad	A	Medición	Protocolo de prueba
		Voltaje	V	Medición	Protocolo de prueba
		Proporción del electrolito por litro de litro.	gr/l	Medición	Protocolo de prueba
		Caudal	l/min	Medición	Protocolo de prueba
		Presión	PSI	Medición	Protocolo de Prueba

Nota. La tabla detalla indicadores importantes del sistema de generación de hidrógeno.

Variable dependiente

Parámetros característicos del MCI.

Tabla 2

Operacionalización de la variable dependiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Para el rendimiento del MCI se debe determinar parámetros, como: potencia, torque, consumo y gases contaminantes producto de la combustión.	Datos de entrada	Velocidad	m/s	De campo	Protocolo de prueba
		Tiempo	s	De campo	Protocolo de prueba
		Densidad del aire	k/m ³	De campo	Protocolo de prueba
		Revoluciones por minuto	rpm	De campo	Protocolo de prueba
		Cilindrada	cc	De campo	Protocolo de prueba
	Combustible	l	De campo	Protocolo de prueba	
	Datos de salida	Potencia	kW	De campo	Protocolo de prueba
		Torque	Nm	De campo	Protocolo de prueba
		Consumo combustible	l/km	De campo	Protocolo de prueba
		Dióxido de	%	De	Protocolo de

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
		carbono CO ₂	vol	campo	prueba
		Monóxido de carbono CO	% vol	De campo	Protocolo de prueba
		Hidrocarburos no combustionados HC	ppm vol	De campo	Protocolo de prueba
		Mezcla estequiométrica λ	-	De campo	Protocolo de prueba
		Oxígeno O ₂	% vol	De campo	Protocolo de prueba

Nota. La tabla detalla indicadores importantes de potencia, torque, consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Metodología de desarrollo del proyecto

Para la investigación se utilizó diversos métodos y técnicas generales para las diversas ramas de la ciencia, a través de procedimientos con mayor o menor énfasis, al momento de su desarrollo, con los siguientes métodos: Inductivo, deductivo, trabajo de campo, experimental, medición, comparativo y de matematización para el desarrollo de la investigación.

Método inductivo

Con la información relevante a las energías alternativas del estudio del rendimiento térmico y mecánico del motor, se buscó estudiar la implementación del hidrógeno como carburante adicional a la mezcla a/c de los motores de combustión interna para el ciclo Otto. Averiguando el modo de funcionamiento del generador de hidrógeno de celda seca, su

instalación, partes del sistema y sus beneficios en los parámetros de desempeño que pueda obtener del motor OPEL 1800 cc.

Método deductivo

Mediante las pruebas con el dinamómetro, el analizador de gases y de ruta al motor OPEL 1800 cc, se analizó la tabulación de los resultados obtenidos de los parámetros característicos de desempeño del motor: potencia, torque, consumo de combustible y emisión de gases que indica si es factible inyectar hidrógeno, en su proporción adecuada a la cámara de combustión con el sistema de generación de hidrógeno de celda seca, procediendo a los cálculos del rendimiento del motor.

Método de campo

Se orientó a la práctica correcta de instalación mecánica y eléctrica del generador de hidrógeno con cada uno de sus componentes, estableciendo su manejo y mantenimiento con los diversos procesos que conlleva a realizar el estudio de los parámetros característicos de desempeño del motor.

Método Experimental

A través del desarrollo de experimentos y trabajo de campo se desarrolló pruebas de torque, potencia, consumo de combustible y emisiones contaminantes con la utilización del dinamómetro, analizadores de gases y equipo especializado respectivamente, para el desarrollo de cada una de las pruebas al implementar el generador de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna Opel 1800 cc.

Método de medición

A través de las pruebas del dinamómetro, analizador de gases y equipos orientados a la tabulación de datos se obtuvo las mediciones en valores numéricos y porcentaje de los parámetros característicos de desempeño del motor, tales como: potencia, torque y consumo.

Incluyendo por defecto la reducción en porcentajes de las emisiones provocadas por el motor y la rentabilidad del combustible al implementar el generador de hidrógeno.

Método comparativo

Permitió establecer las similitudes y diferencias: de la potencia, torque, consumo de combustible y emisiones contaminantes del motor OPEL 1.8CC usando solamente el combustible convencional como la gasolina Extra y Super a comparación cuando el motor lleve implementado el generador de hidrógeno de celda seca.

Método de matematización

Se realizó el cálculo del rendimiento térmico y mecánico del motor OPEL una vez implementado el generador de hidrógeno, verificando datos como la proporción de mezcla de agua e Hidróxido de Potasio utilizada para la producción de hidrógeno que se necesita.

Tabla 3

Metodología de la investigación

Metodología	Descripción	Equipo	Instalaciones y citas-virtual
Inductivo	Con la información relevante a las energías alternativas, el estudio del rendimiento térmico y mecánico del motor, se buscó estudiar la implementación del hidrógeno como carburante adicional a la mezcla a/c de los motores de combustión interna para el ciclo Otto. Averiguando el modo de	Computador, Microsof Excel	Laboratorio de Autotrónica - Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE

Metodología	Descripción	Equipo	Instalaciones y citas-virtual
	<p>funcionamiento del generador de hidrógeno de celda seca, su instalación, partes del sistema y sus beneficios en los parámetros de desempeño que pueda obtener del motor OPEL 1800 cc.</p>		
Deductivo	<p>Mediante las pruebas con el dinamómetro, el analizador de gases y de ruta al motor OPEL 1800 cc, se analizó la tabulación de los resultados obtenidos de los parámetros característicos de desempeño del motor: potencia, torque, consumo de combustible y emisión de gases que indica si es factible inyectar hidrógeno, en su proporción adecuada, a la cámara de combustión con el sistema de generación de hidrógeno de celda seca, procediendo finalmente a los cálculos del rendimiento del motor.</p>	<p>Computador, dinamómetro, analizador de gases Microsoft Excel,</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica - Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"</p>
De Campo	<p>Se orientó a la práctica correcta de instalación mecánica y eléctrica del</p>	<p>Computador Herramientas y</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica -</p>

Metodología	Descripción	Equipo	Instalaciones y citas-virtual
	<p>generador de hidrógeno con cada uno de sus componentes, estableciendo su manejo y mantenimiento con los diversos procesos que conlleva a realizar el estudio de los parámetros característicos de desempeño del motor.</p>	equipos de taller	Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE
Experimental	<p>A través del desarrollo de experimentos y trabajo de campo se desarrolló pruebas de torque, potencia, consumo de combustible y emisiones con la utilización del dinamómetro, analizadores de gases y equipo especializado respectivamente, para el desarrollo de cada una de las pruebas al implementar el generador de hidrógeno de celda seca en el motor de combustión interna Opel 1800 cc.</p>	<p>Computadora Dinamómetro Analizador de gases</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica - Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE</p>
Medición	<p>A través de las pruebas del dinamómetro, analizador de gases</p>	<p>Computador, software de</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica -</p>

Metodología	Descripción	Equipo	Instalaciones y citas-virtual
	<p>y equipos orientados a la tabulación de datos se obtuvo las mediciones en valores numéricos y porcentaje de los parámetros característicos de desempeño del motor, tales como: potencia, torque y consumo. Incluyendo por defecto la reducción en porcentajes de las emisiones provocadas por el motor y la rentabilidad del combustible al implementar el generador de hidrógeno.</p>	<p>medición del dinamómetro y analizador de gases</p>	<p>Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"</p>
Comparativo	<p>Permitió establecer las similitudes y diferencias: de la potencia, torque, consumo de combustible y emisiones contaminantes del motor OPEL 1.8CC usando solamente el combustible convencional como la gasolina Extra y Super a comparación cuando el motor lleve implementado el generador de hidrógeno de celda seca.</p>	<p>Computador, Microsoft Excel</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica - Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"</p>
Matematización	<p>Se realizó el cálculo del</p>	<p>Computador,</p>	<p>Laboratorio de</p>

Metodología	Descripción	Equipo	Instalaciones y citas-virtual
	rendimiento térmico y mecánico del motor OPEL una vez implementado el generador de hidrógeno, verificando datos como la proporción de mezcla de agua e Hidróxido de Potasio utilizada para la producción de hidrógeno que se necesita.	Microsoft Office	Autotrónica - Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE

Nota. Metodología de la investigación.

Capítulo II

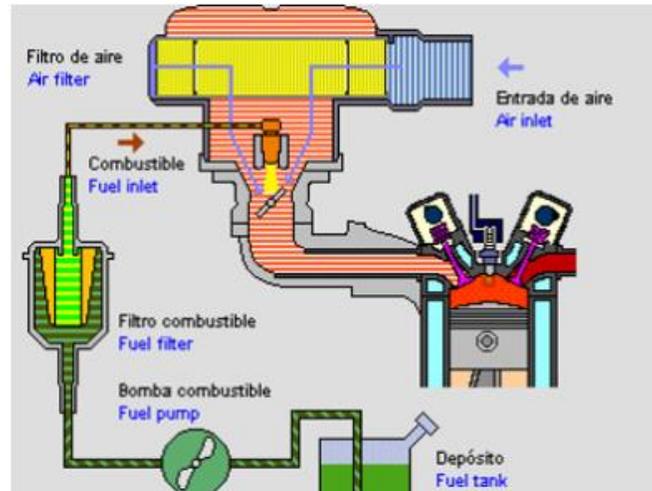
Marco teórico

Descripción general de los motores OTTO

Un motor de ciclo OTTO transforma la energía termoquímica en movimiento, es decir en energía mecánica, este ciclo se caracteriza por el tema de encendido provocado. En el circuito de admisión del motor se crea una depresión, por el cual el aire ingresa a la cámara de combustión, es decir que esta depresión es inferior a la atmosférica, a la par se mezcla con el combustible con el cual se obtendrá la combustión el cual depende de factores como: adelanto al encendido, factor lambda, carga, régimen de giro y calidad del combustible, como se observa en la figura 2 en donde se representa el esquema simplificado del circuito. Conocemos que el aire exterior se encuentra a presión atmosférica y la temperatura se considera del ambiente, además de la altitud donde el motor se desarrolla influye directamente sobre el funcionamiento, es decir a mayor altura puede bajar su potencia debido a que disminuye la densidad del aire. (Rivera et al., 2017)

Figura 2

Esquema Simplificado del Circuito de Aire, Escape y Combustible de un Motor de Gasolina



Nota. Esquema simplificado del circuito de aire, escape y combustible de un motor de gasolina.

Tomada de: (Auto desguace Matías, 2021)

Par motor

El par motor es uno de los parámetros más importantes en el motor, además de ser una variable en nuestra aplicación: “El par motor (M) es el producto de la fuerza aplicada sobre un cuerpo para hacerle girar, por la distancia al punto de giro” (Secundino, 2011, p. 91).

Según Castillo et al. (2017) el torque está determinado por la ecuación (1):

Ecuación 1

Fórmula de torque del motor

$$T = F_b * r \quad (1)$$

Donde:

T : Torque o par motor [$N \cdot m$]

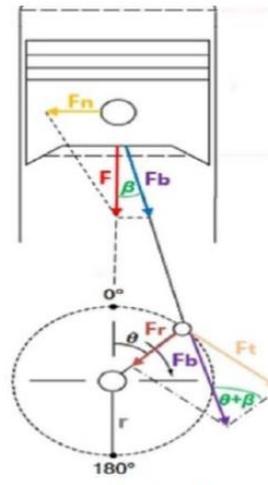
F_b : Fuerza sobre la biela [N]

r : Radio de la manivela del cigüeñal [m]

En la figura 3 se puede observar el esquema para la obtención del par motor, mediante el tren alternativo.

Figura 3

Esquema para la obtención del par motor



Nota. Esquema para la obtención del par motor. Tomada de: (Castillo et al., 2017).

Potencia

La potencia en un motor se puede ver afectada por la mezcla del tipo de carburante recomendado por el fabricante: “La potencia (P) es el trabajo desarrollado por unidad de tiempo. La potencia de un vehículo se desarrolla en el desplazamiento de la carga” (Secundino, 2011, p. 92).

Castillo et al. (2017) menciona que:

El concepto de potencia expresa cuántas veces está disponible el par motor en el tiempo, es decir, con qué velocidad se puede disponer del par. La potencia desarrollada por un motor depende de la relación de compresión y de la cilindrada, ya que a mayores valores de estas le corresponde mayor explosión y más fuerza aplicada al pistón; también depende íntimamente de las revoluciones por minuto a las que gira el motor. (pp. 50-51)

Entonces la potencia está determinada por la ecuación (2):

Ecuación 2

Fórmula de la potencia mecánica (Castillo et al., 2017)

$$P = T * w = \frac{T * n}{\frac{60}{2\pi}} \quad (2)$$

Donde:

P : Potencia del motor (kW)

T : Torque o par motor (N.m)

w : Velocidad angular del eje del cigüeñal (rad/s)

n : Revoluciones por minuto (rpm)

Es muy importante trabajar con las unidades adecuadas, para los distintos parámetros característicos del motor, para ello se observa en la tabla 3 un resumen de las magnitudes.

Tabla 4

Magnitudes de la unidad didáctica

Magnitud	Símbolo	Fórmula	Unidades
Tiempo	t	-	Segundos (s)
Espacio	e	-	Metros (m)
Masa	m	-	Kilogramos (kg)
Velocidad	v	$v = e/t$	m/s
Aceleración	a	$a = v/t$	m/s^2
Fuerza	F	$F = m \cdot a$	Newton (N)
Trabajo	T	$T = F \cdot e$	Julio (J)
Potencia	P	$P = T/t$	Vatios (W)

Nota. Secundino, E. (2011). *Magnitudes de la unidad didáctica*. [Tabla]. Macmillan Iberia, S.A.

<https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/101844>

Consumo de combustible

Una idea de Cabrera 2009 leída en una publicación de Velástegui y Jesús en (2015):

Al respecto: Todo vehículo tiene especificaciones técnicas, dentro de las cuales está el consumo específico de combustible, pero este valor está muy por encima del real ya que este valor se obtiene bajo condiciones óptimas de funcionamiento, tanto del propio vehículo, como de las condiciones exteriores como el clima, tipo de carretera. Por esto es importante la medición del consumo de combustible que tiene por objeto controlar la cantidad de combustible que se consume en determinada distancia. (Cabrera, 2009, como se citó en Velástegui y Jesús, 2015, p.14).

El consumo específico de combustible se determina con la ecuación:

Ecuación 3

Consumo Específico de combustible (Tamayo et al., 2016)

$$c_e = \frac{m_f \left[\frac{g}{s} \right] * 3600 * V_T [m^3] n_i * n_m}{n_t [kW] * n_v}$$

Donde:

c_e : Consumo específico

m_f : Flujo másico de combustible

V_T : Volumen total motor

n_i : Rendimiento Interno

n_m : Rendimiento mecánico

n_t : Potencia teórica

n_v : Rendimiento Volumétrico

Rendimientos: Térmico, mecánico y efectivo

Secundino (2011) En comparación del rendimiento de ciclo OTTO real y teórico menciona que:

Comparando el diagrama resultante del ciclo otto real con el teórico, puede comprobarse que el rendimiento es inferior al esperado, resultando un trabajo útil menor, determinado por la superficie representada en la figura 4.12.

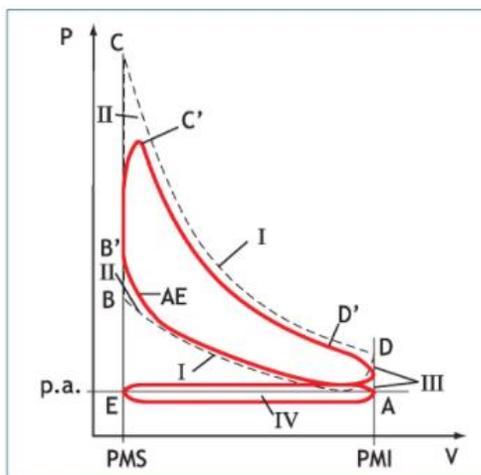
Las diferencias de trabajo entre el ciclo teórico y el real se deben, esencialmente, a las siguientes causas.

- Pérdidas de calor a través de las paredes, debido a la necesidad de refrigerar los órganos del motor.
- Necesidad de anticipar el encendido con respecto al PMS, ya que la combustión no es instantánea y necesita de un determinado tiempo.
- Avance de apertura del escape, ligado a la inercia de las válvulas y de las masas de los gases.
- Pérdida de trabajo de bombeo durante la carrera de escape y de admisión.

(p. 69)

Figura 4

Diferencia Entre el Diagrama Real y el Teórico



Nota. Secundino, E. (2011). *Diferencia entre el Diagrama Real y el Teórico.* [Gráfico]. Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/101844>

El rendimiento es uno de los parámetros fundamentales en la matematización: “El rendimiento de un motor es el resultado de dividir la cantidad de calor aprovechada por el motor entre la generada por el mismo” (Secundino, 2011, p. 95).

Ecuación 4

Calor suministrado (Mena, 2018)

$$q_1 = c_v(T_z - T_c)$$

Donde:

$$q_1 = \text{Cantidad de calor suministrado} \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$c_v = \text{Calor específico a volumen constante} \left(0.718 \frac{KJ}{Kg * K} \right)$$

$$T_z = \text{Temperatura de combustión (K)}$$

$$T_c = \text{Temperatura de compresión (K)}$$

Ecuación 5

Calor extraído (Mena, 2018)

$$q_2 = c_v(T_b - T_a)$$

Donde:

$$q_2 = \text{Cantidad de calor extraído} \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$c_v = \text{Calor específico a volumen constante} \left(0.718 \frac{KJ}{Kg * K} \right)$$

$$T_a = \text{Temperatura de admisión (K)}$$

$$T_c = \text{Temperatura de expansión (K)}$$

Ecuación 6*Trabajo del ciclo (Mena, 2018)*

$$q_c = q_1 - q_2$$

Donde:

$$q_c = \text{Trabajo del ciclo} \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

Ecuación 7*Eficiencia térmica (Mena, 2018)*

$$n_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_b - T_a}{T_z - T_c}$$

$$n_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

Donde:

 $n_t = \text{Eficiencia térmica}$ $k = \text{Coeficiente adiabático}$ **Ecuación 8***Temperatura de compresión (Mena, 2018)*

$$T_c = T_a \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{k-1} = T_a \varepsilon^{k-1}$$

Ecuación 9*Temperatura de combustión (Mena, 2018)*

$$T_z = T_c \left(\frac{P_z}{P_c} \right) = \lambda T_c = \lambda \varepsilon^{k-1} T_a$$

Ecuación 10*Temperatura de expansión (Mena, 2018)*

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{k-1} = T_z \left(\frac{V_c}{V_a} \right)^{k-1} = T_z \left(\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) = \lambda T_a$$

Ecuación 11*Presión media del ciclo (Mena, 2018)*

$$P_{mc} = P_a \left(\frac{\varepsilon^k (\lambda - 1)}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} \right) \eta t$$

Donde:

 P_{mc} = Presión media del ciclo (Pa) P_a = Presión de admisión (Pa) λ = Grado de elevación de la presión**Formación de la mezcla****Ecuación 12***Coefficiente de exceso de aire (Mena, 2018)*

$$\alpha = \frac{l}{l_0}$$

$$\alpha = 0.8 - 0.9 \text{ M.G.}$$

$$\alpha = 1.2 - 1.5 \text{ M.D.}$$

Donde:

 α = Coeficiente de exceso de aire l = Masa real de aire en combustión de 1kg de combustible

$l_0 =$ Cantidad teórica necesaria (kg)

Ecuación 13

Cantidad máxima en masa de aire (Mena, 2018)

$$G_o = V_a \rho_o$$

Donde:

$G_o =$ Cantidad máxima en masa de aire (kg)

$V_a =$ Volumen total del cilindro (cm^3)

$\rho_o =$ Densidad del aire a P y T ambiente ($\frac{kg}{cm^3}$)

Ecuación 14

Densidad del aire al final de admisión (Mena, 2018)

$$\rho_a = \frac{P_a}{RT_o} \quad \rho_a = \frac{P_a}{P_o} \rho_o$$

Donde:

$\rho_o =$ Densidad del aire a P y T ambiente ($\frac{kg}{cm^3}$)

$\rho_a =$ Densidad del aire al final de admisión ($\frac{kg}{cm^3}$)

Ecuación 15

Masa de la carga en admisión (Mena, 2018)

$$G = \rho_a V_a = \rho_o V_a \frac{P_a}{P_o}$$

Donde:

$G = \text{Masa de la carga a } P_a, T_a \text{ y } \rho_a (\text{kg})$

Ecuación 16

Temperatura de la carga al finalizar el llenado (Mena, 2018)

$$T'_{o} = T_{o} + \Delta T$$

Donde:

$T'_{o} = \text{Temperatura de la carga al finalizar el llenado (K)}$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura de la carga (K)}$

$T_{o} = \text{Temperatura ambiente (K)}$

Ecuación 17

Densidad de la carga al terminar admisión (Mena, 2018)

$$\rho = \frac{P_a}{RT'_{o}} \quad \rho = \rho_o \frac{P_a T_o}{P_o T'_{o}}$$

Donde:

$\rho = \text{Densidad de la carga al terminar admisión } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$

$R = \text{Constante universal de los gases } \left(287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} \right)$

Ecuación 18

Coefficiente de gases residuales (Mena, 2018)

$$\gamma_{res} = \frac{M_r}{M_1}$$

$$\gamma_{res} = 0.06 \text{ a } 0.10 \text{ M. G.}$$

$$\gamma_{res} = 0.03 \text{ a } 0.06 \text{ M. D.}$$

$$\gamma_{res} = 0.4 \text{ (2 tiempos)}$$

Donde:

M_r = Cantidad de gases residuales (kmol)

M_1 = Cantidad de carga fresca (kmol)

Ecuación 19

Temperatura al final de la admisión (Mena, 2018)

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \gamma_{res} T_r}{1 + \gamma_{res}}$$

$$T_r = 900 \text{ a } 1000 \text{ K MG}$$

$$T_r = 700 \text{ a } 900 \text{ K MG}$$

$$P_r = 1.1 \text{ a } 1.25 \text{ bar Presión al final de escape}$$

Donde:

T_a = Temperatura de la mezcla al final de la admisión (K)

T_r = Temperatura gases quemados (K)

Ecuación 20

Cantidad de calor que aporta la carga fresca tomando en cuenta el calentamiento de las paredes del cilindro (Mena, 2018)

$$Q_{cf} = C_p G_1 (T_o - \Delta T)$$

Donde:

$Q_{cf} =$ Cantidad de calor por las paredes del cilindro (KJ)

$G_1 =$ Cantidad real de carga fresca que entra al cilindro (gr)

Ecuación 21

Cantidad de calor que conservan los gases residuales (Mena, 2018)

$$Q_r = c''_p G_r T_r$$

Donde:

$Q_r =$ Cantidad de calor de los gases residuales (KJ)

$c''_p =$ Capacidad calorífica de combustión a $P = cte.$ $\left(\frac{KJ}{kg * K}\right)$

$G_r =$ Cantidad de gases residuales (gr)

$R_m =$ Constante de los gases residuales $\left(\frac{KJ}{kg * K}\right)$

Ecuación 22

Cantidad de carga fresca que podría entrar al cilindro (Mena, 2018)

$$G_o = \frac{P_o V_h}{R_o T_o}$$

Donde:

$R_o =$ Constante universal de los gases $\left(\frac{KJ}{kg * K}\right)$

$R_m =$ Constante de los gases residuales $\left(\frac{KJ}{kg * K}\right)$

Reducción de emisiones de gases producto de la combustión

Iniestra et al. (2009) describió que, si en un motor se lograra obtener una combustión sumamente perfecta, el oxígeno en el aire convertiría todo el hidrógeno del combustible en agua y además todo el carbono en dióxido de carbono. Pero en realidad un motor de combustión interna no ha conseguido tales parámetros, por ende, generan ciertos gases contaminantes, productos de una combustión ineficiente (p.28).

En la figura 5 se expresa de forma cualitativa la variación de emisiones de los gases contaminantes principales en los motores de ciclo OTTO.

Dióxido de carbono CO₂

Iniestra et al. (2009) describió que el dióxido de carbono no perjudica directamente contra la salud, pero se considera un gas con un alto efecto invernadero que retiene el calor de la tierra y contribuye fuertemente al calentamiento global (p.29).

Monóxido de carbono CO

De Pratt et al. (2003) menciona que: “El monóxido de carbono es un compuesto que se forma debido a la combustión incompleta de la madera, aceites y carbón. Está presente en los humos de los automóviles y el tabaco” (p. 6). Es conocido que el mundo automotor es una de las áreas que mayor contaminan la atmósfera por causa de sus gases contaminantes.

De Antonio & Muñoz (2015) menciona que: “las emisiones de CO crecen con la riqueza: las emisiones son bajas y crecientes (crecen por el aumento de temperatura) para mezclas pobres y crecen bruscamente cuando la mezcla empieza a tener falta de oxígeno” (p. 124).

Hidrocarburos no combustionados HC

Iniestra et al. (2009) menciona que: “Las emisiones de hidrocarburos resultan cuando no se quema completamente el combustible en el motor” (p. 28). La quema ineficiente del combustible provoca gases contaminantes, que son expulsados a la atmósfera.

De Antonio & Muñoz (2015) menciona que:

Existe un mínimo de emisiones de HC en el lado pobre: cuanto mayor es la riqueza, mayor concentración de hidrocarburos existe en la mezcla y, por tanto, la cantidad de inquemados será mayor. Con mezclas muy pobres la tendencia se invierte por apagados locales de llama. De ahí la existencia de un mínimo” (p. 124).

De Antonio & Muñoz (2015) menciona que:

Las emisiones se reducen con el empleo de inyección multipunto frente a la monopunto o el uso de carburador, y con la inyección multipunto frente a la monopunto o el uso de carburador, y con la inyección directa en mayor medida, como también se menciona en el tema de formación de la mezcla. Por último, la sobrealimentación contribuye a reducir las emisiones de hidrocarburos, ya que para una potencia dada el tamaño del motor puede ser más pequeño. (pp. 83-84)

Óxido de nitrógeno NOX

Iniestra et al. (2009) menciona que:

Bajo las condiciones de alta temperatura y presión que imperan en el motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes, que se conocen de manera colectiva como NO_x. (p.28)

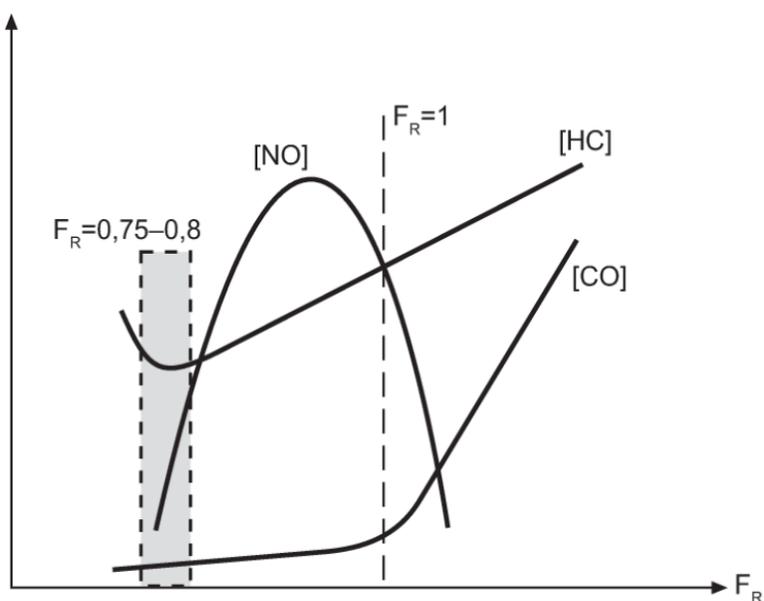
De Antonio & Muñoz (2015) describió que: para reducir emisiones de NOX el parámetro más efectivo es actuar en la temperatura de la combustión, volviendo a usar los gases residuales del ciclo anterior, en la actualidad esto se puede lograr con el sistema EGR. (p. 124)

De Antonio & Muñoz (2015) menciona que:

Existe un máximo de emisiones de NOX cerca del dosado estequiométrico: en efecto, la formación crece con la temperatura de combustión, más alta en condiciones de estequiometría, pero también crecen por el exceso de oxígeno, por lo que el máximo se sitúa en la región pobre de la gráfica, cerca de la estequiometría (p. 124).

Figura 5

Concentración de Emisiones Contaminantes en el MEP en función del dosado relativo.



Nota. De Antonio & Muñoz (2015). *Concentración de Emisiones Contaminantes en el MEP en función del dosado relativo.* [Gráfica]. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/48846>

El hidrógeno

De (De Antonio & Muñoz, 2015) (1998) mencionan que: “El hidrógeno es el elemento más liviano de la naturaleza. Bajo condiciones normales es un gas incoloro, inodoro e insaboro, cuya combustión completa es muy limpia siempre y cuando la temperatura es moderada” (p. 73). Es sabido que la combustión del hidrógeno produce vapor de agua, lo cual constituye una

de las energías alternativas más limpias que existen en el planeta y que abundan en el universo.

Inclusive se dan detalles de su estructura molecular y lo que sucedería si este tipo de combustible se lo pudiera almacenar fácilmente como Asensio (2007) menciona:

El átomo de hidrógeno común está formado por un protón y electrón. Como no tiene neutrones -las partículas sin carga, pero con masa que mantienen unidos por los protones en el núcleo- es también el elemento más ligero de todos, casi 15 veces más que el aire.

Responsable del brillo de las estrellas y fuentes de la energía que recibimos de la que tenemos más cerca, el Sol, el hidrógeno es, además, el elemento más abundante del Universo: las tres cuartas partes de la materia cósmica son hidrógeno, que podríamos utilizar como combustible si estuvieran a nuestro alcance. (p. 3)

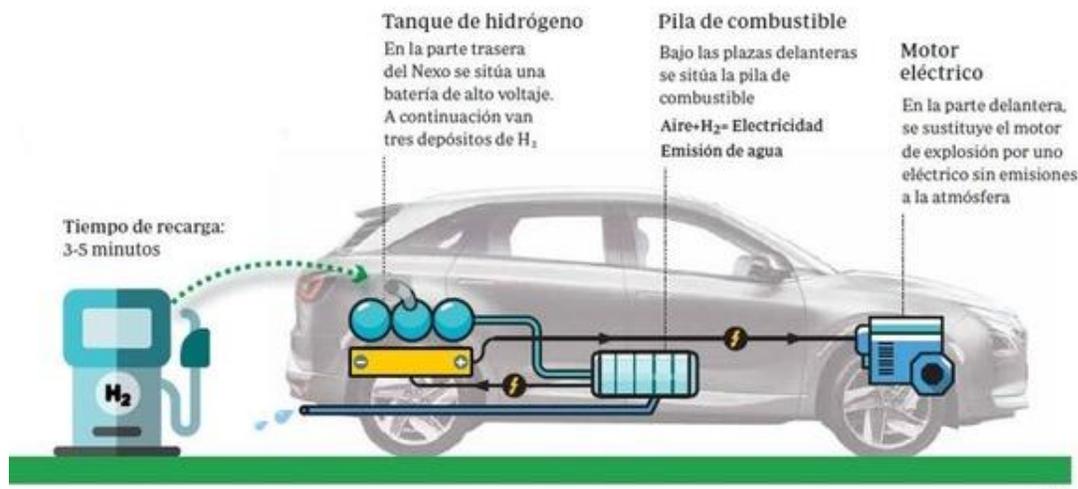
Aplicaciones del hidrógeno en la industria automotriz

Hidrógeno como pila de combustible

Comúnmente se ha escuchado que el hidrógeno se utiliza en los vehículos como celda de combustible, una nueva tecnología donde Díaz (2009) afirma que: "La celda de combustible es básicamente un dispositivo electroquímico que sigue los mismos principios que las baterías. Este dispositivo produce electricidad utilizando hidrógeno y oxígeno como fuentes primarias" (p. 11). Este proceso lo que busca es que el hidrógeno al combinarse con el oxígeno produzca energía eléctrica, sencillamente es la electrólisis del agua revertida, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Funcionamiento del hidrógeno como pila de combustible.



Nota. (Fernández, 2019). Desmontando mitos sobre el coche de hidrógeno [Fotografía]. ABC Motor. <https://bit.ly/3leZkQq>

Hidrógeno como carburante adicional

Ahora bien, el hidrógeno se lo puede utilizar como carburante adicional a la mezcla aire - combustible, mejorando la combustión y optimizando parámetros característicos del motor. El gas generado es inyectado directamente en el motor, donde la combustión del hidrógeno es 10 veces más rápida que la llama del combustible convencional (gasolina), llenando espacios vacíos que existen entre las moléculas, es decir, el hidrógeno se asimila a una bujía gigante que enciende todo el combustible para una combustión limpia y completa. (Technology, B. F., 2022)

Propiedades del hidrógeno

El estudio del hidrógeno como fuente de energía alternativa en el uso de vehículos, ya sea como pila de combustible o un carburante adicional a la mezcla aire - combustible, lo

vuelven en una solución potencial en motores de combustión interna, debido a las siguientes características que Díaz (2009) menciona que:

El hidrógeno es el gas menos denso conocido, con una densidad de 0.08376 Kg/m³ a 20° C y 1 bar. Su poder calorífico inferior es muy elevado por unidad de masa (119083 kJ/g frente a 55,53 kJ/g del metano) pero, debido a su baja densidad, su poder calorífico inferior por unidad de volumen es muy bajo (10.050 kJ/m³ frente a, por ejemplo, los 32.560 kJ/m³ del metano a 15° C y 1 bar). Tiene una muy baja energía de activación y muy amplios rangos de inflamabilidad y explotabilidad, por lo que cualquier mezcla con aire prende o explota fácilmente. (pág. 6)

Obtención del hidrógeno

Existen métodos alternativos de producción de hidrógeno, tales como: la descomposición termoquímica del agua, foto conversiones, producción a partir de biomasa y procedimientos industriales. Muchos de estos métodos son experimentales y producen pequeñas cantidades de hidrógeno.

Electrólisis del agua

Uno de los métodos para conseguir el hidrógeno a partir del agua es la electrólisis, donde Asensio (2007) menciona que:

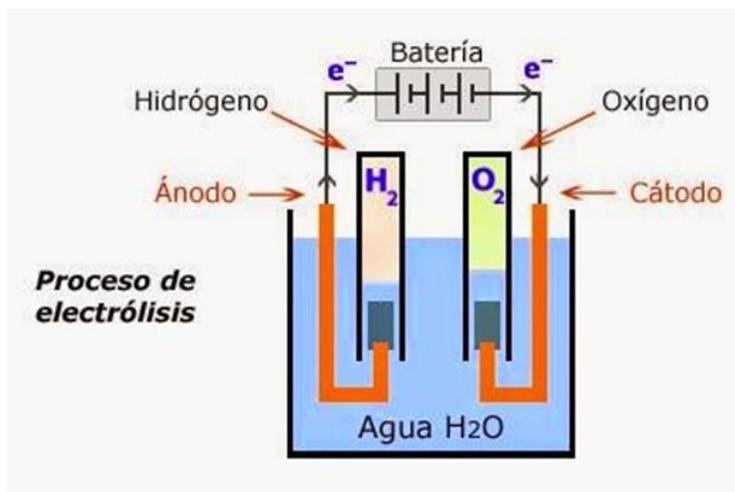
Desde el siglo XIX el hombre sabe cómo separar el hidrógeno y el oxígeno que forman el agua aplicando una corriente eléctrica. El proceso se llama, como saben hasta los niños, electrolisis y se trata de una tecnología conocida y tan sencilla que forma parte de los experimentos que se realizan en los colegios. La electrólisis, además, es limpia y produce un hidrógeno de gran pureza. (pp. 4,6)

Este proceso de electrólisis es un método que descompone el agua en sus dos moléculas, hidrógeno y oxígeno, para ello se utiliza bicarbonato de sodio que forma el

compuesto ionizable. Al aplicar corriente se genera “una diferencia de potencial entre los electrodos lo cual causa que los iones positivos de oxígeno se muevan hacia el electrodo negativo y los iones negativos de hidrógeno se muevan hacia el electrodo positivo” (Díaz, 2009, p. 7). Aquel proceso de separación se puede visualizar en la figura 7.

Figura 7

Separación del hidrógeno y oxígeno por medio de la electrólisis



Nota. (Fabitroncoso, 2014) Electrolisis de agua [Fotografía]. WordPress. <https://bit.ly/3KLSCmP>

Reformado de hidrocarburos

Muchos de los combustibles como el metano, metanol, gasolina y diésel pueden pasar por este proceso, en el cual Fábrega (2009) menciona que:

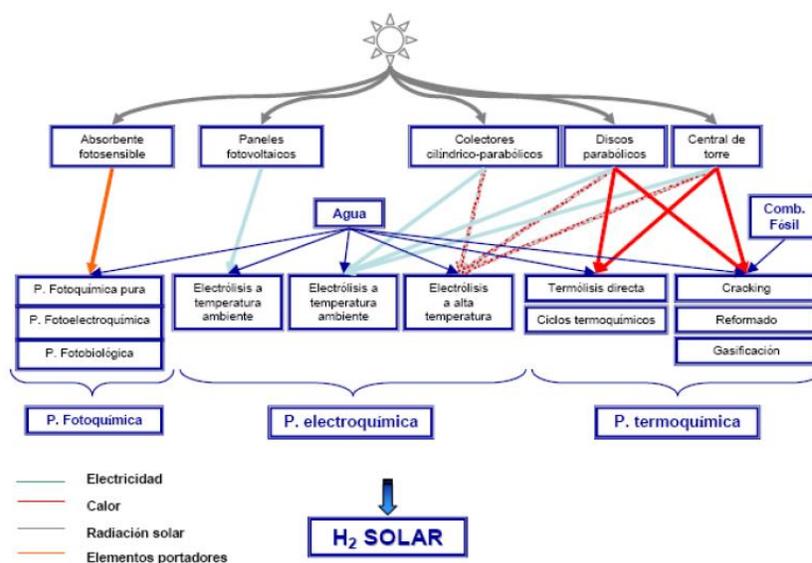
El reformado es un proceso químico en el cual reacciona el hidrógeno contenido en algunos combustibles con la presencia de vapor, oxígeno o ambos en una corriente de gas rica en hidrógeno. Cuando el reformado se refiere a los combustibles sólidos, el proceso se llama gasificación. La mezcla rica en hidrógeno del gas resultante se llama reformado. (p. 70)

A partir de energía solar

Díaz (2009) menciona que: “La producción de hidrógeno a partir de energía solar se divide en tres conjuntos que son básicamente los procesos fotoquímicos, electroquímicos y termoquímicos. Estos conjuntos se pueden mezclar entre sí, para otros conjuntos más específicos, (ejemplo: fotoelectrólisis)” (p. 8). Los diferentes conjuntos de procesos se pueden visualizar en la figura 8.

Figura 8

Producción de hidrógeno a partir de energía solar.



Nota. (Díaz D. , 2009) Hidrógeno a partir de energía solar [Fotografía]. UNIANDES.

<https://bit.ly/3KJ0Z2e>

Formas de almacenamiento del hidrógeno

Fábrega (2009) menciona que:

Si el principal desafío en el uso del hidrógeno como combustible es su obtención y extracción, el segundo principal desafío es saber cómo almacenarlo. Cuando se han tratado las características del hidrógeno, hemos visto que, de todos los elementos

conocidos, tiene la menor densidad de gas y el segundo punto de ebullición más bajo, con lo que supone un reto a la hora de almacenarlo tanto en formato gaseoso como líquido.

La baja densidad del hidrógeno, tanto si se encuentra en estado líquido como en gaseoso, da lugar también a una densidad de energía reducida. Dicho de otra manera, un volumen dado de hidrógeno contiene menos energía que el mismo volumen de otros combustibles. Esto aumentará también el tamaño relativo del tanque de almacenaje, pues se requerirá mayor cantidad de hidrógeno para resolver los requisitos de cualquier vehículo. (p. 88)

Sistema de generación de hidrógeno de celda seca

A continuación, se detallan los diferentes elementos que constan en el sistema de generación de celda seca.

Reactor de hidrógeno de celda seca

El generador de hidrógeno es un elemento mecánico del sistema que “separa el hidrógeno y el oxígeno del agua, de manera que el gas de hidrógeno puede ser utilizado en diversas aplicaciones y pueden ser en los motores” (Duque y Masaquiza, 2013, p. 18). Es decir, el hidrógeno se inyecta directamente en la cámara de combustión para que sirva de carburante adicional a la mezcla tradicional de aire - combustible. El generador de hidrógeno de celda seca es el más apropiado porque la corriente que utiliza de la batería se asemeja a la del radio, entre 5 a 8 amperios.

Celdas electrolizadoras secas del generador

En este sistema se utilizan celdas electrolizadoras secas donde Juma y Martínez (2015) mencionan que:

Las celdas secas o conocidas como dry cells se caracterizan porque, a diferencia de las celdas húmedas, no se encuentran sumergidas en agua, es decir, la misma celda es el contenedor. Los electrodos de este tipo de celdas están separados por juntas (generalmente de caucho) las cuales evitan que el agua se escape de la celda hacia las conexiones eléctricas o que el electrolito se ponga en contacto con los bordes de dichas placas.

Las ventajas de este tipo de celdas con respecto a las celdas húmedas radican en que, teniendo en cuenta su superficie, se puede utilizar menos electrolito. Por lo tanto, el volumen y el peso de la celda es menor. (p.26) Normalmente este tipo de celdas se fabrican de acero inoxidable.

Mangueras

Es un tubo hueco que transporta los fluidos, es flexible y generalmente son cilíndricas, las que más se utilizan son las mangueras de goma que como principal característica absorben vibraciones, son flexibles y de fácil aplicación. La parte interna del tubo debe tener una resistencia mecánica a la presión de trabajo, resistencia a la aspiración y colapsado. La parte externa brinda protección a altas temperaturas, altas presiones y condiciones de trabajo severas. (Duque & Masaquiza, 2013)

Depósito o burbujeador

Reyes et al. (2018) menciona que:

El burbujeador es un compartimento de seguridad el cual se encuentra en la parte interior del reservorio, actúa como separador de las burbujas generadas en el depósito con el agua del mismo; se considera al reservorio y al burbujeador un solo cuerpo. En lo referente a su estructura es un recipiente parcialmente lleno de agua, en este caso el nivel del mismo no será inferior al $\frac{1}{4}$ de la capacidad total del reservorio, de forma

adicional no superará los $\frac{3}{4}$ debido a la conexión de la manguera de hidrógeno hacia la admisión, de lo contrario el motor absorbería agua y no gas. (p. 24)

Relé

Pérez (2003) menciona que:

Definimos un relé electromagnético como aquel interruptor mandado a distancia, que vuelve a la posición de reposo cuando la fuerza de accionamiento deja de actuar sobre él. El mando a distancia presenta dos ventajas importantes: primero, la instalación puede efectuarse con una evidente economía, pues bastan dos hilos que unan la bobina del relé con el puesto de mando; segundo, aísla al operario de los puntos peligrosos de la instalación. (p.3)

Cables eléctricos y conectores

El propósito principal del cable eléctrico es la de conducir electricidad debido a su material de alta conductividad que es el cobre, donde los conectores son terminales que unen las conexiones eléctricas, tienen como aislamiento el plástico que son de diferente grosor por el tipo de trabajo que realiza, la corriente que pase por el cable y diversos factores como la temperatura (Martínez & Nilve, 2014, p. 26).

Sustancias y reactivos

Las sustancias y reactivos, que utiliza el generador de hidrógeno de celda seca, son el agua destilada y el Hidróxido de Potasio.

Agua destilada. Dvorak & Skipton (2013, como se citó en Juma y Martínez, 2015) mencionan que:

Se conoce como purificada al agua proveniente de cualquier fuente y que se procesa físicamente con la finalidad de eliminar las impurezas. El agua destilada ha sido una de las formas más comunes y más comerciales de agua purificada utilizada en laboratorios

e industrias. El agua destilada elimina todas las impurezas a través de la destilación. La destilación consiste en hervir el agua para posteriormente condensar el vapor en un recipiente, separando todos los contaminantes sólidos. (p.28)

Hidróxido de Potasio. Según Biggs (2003, como se citó en Juma y Martínez, 2015) menciona que:

En el proceso de electrólisis, el agua destilada no puede conducir la electricidad suficiente por sí sola. Incluso utilizando agua potable, agua de lluvia o agua mineral se puede llevar a cabo el proceso de electrólisis ya que contienen minerales en su composición, pero la producción de gas HHO sería baja. Por esta razón es primordial el uso de electrolitos que se encargan de transportar corriente eléctrica de placa a placa, acelerando la producción de HHO. La mejor opción de electrolito se juzga por su capacidad de permanecer sin cambios en la reacción en la que tiene lugar. Se han realizado pruebas empíricas donde se ha encontrado que el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH) son dos sustancias que catalizan de manera eficiente. Dichas pruebas han demostrado que se produce una mezcla limpia en el generador de gas HHO al utilizar uno de estos dos catalizadores con el agua destilada, por lo tanto se obtendrá una mezcla más homogénea de dicho gas. El hidróxido de potasio es el electrolito de mejor calidad ya que es más estable y no se consume durante el proceso de electrólisis. (pp. 29,30)

Funcionamiento del sistema de generación de hidrógeno

Martínez y Nilve (2014) mencionan que:

Un generador de hidrógeno utiliza como materia prima agua y 12 voltios, por medio de un proceso de electrólisis, el generador de hidrógeno nos proporciona por separado hidrógeno y oxígeno, estos gases altamente combustibles son enviados a la entrada del

aire del motor donde se mezclan con el combustible. La energía del generador mejora la combustión, proporciona mayor potencia, reduce el consumo de combustible y al quemarse disminuye los gases contaminantes. (p. 22)

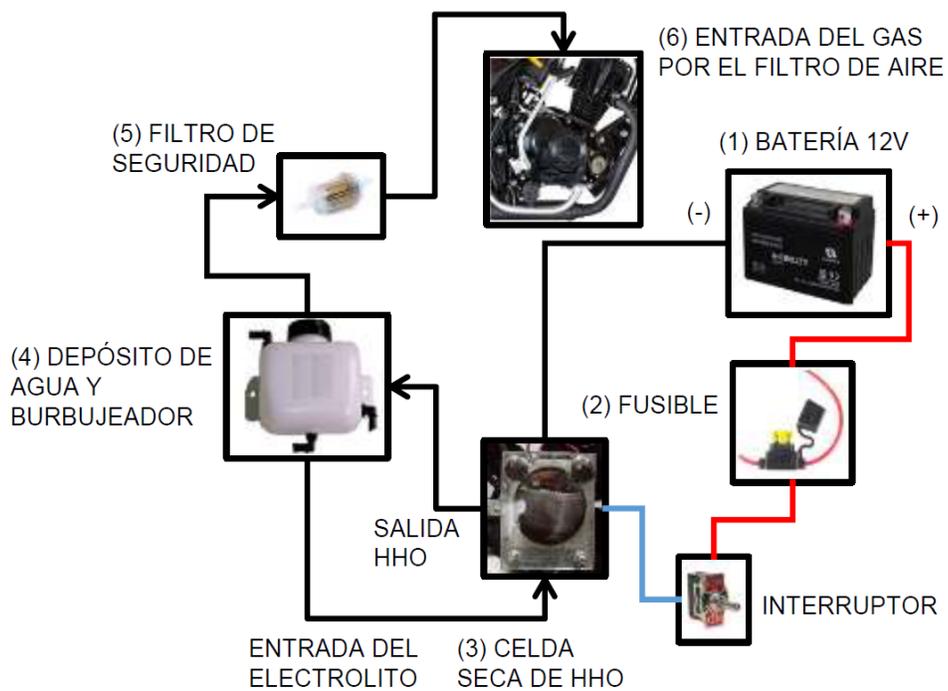
Diagrama de funcionamiento

La configuración general representado en la figura 9, Díaz et al. (2018) indica que el sistema:

Consiste en una celda seca de HHO (1), conectada a una batería de 12 V (2), con un sistema de protección de sobrecargas (fusible) (3), la cual permite que se realice el proceso de electrólisis y se obtenga el gas. El gas realiza el recorrido hasta el tanque de almacenamiento del electrolito (4), que a su vez hace la función de burbujeador, de allí se dirige por una manguera hasta un filtro secador (5) que hace a su vez la función de válvula antiretorno de llama. Luego de este punto el gas es dirigido por otra manguera al filtro de aire de la moto (6), para ser suministrado en la cámara de combustión, entrando simultáneamente con el aire requerido para el proceso. (p. 147)

Figura 9

Funcionamiento del sistema de generación de hidrógeno de celda seca.



Nota. Díaz et al. (2017). Esquema de montaje sistema de producción HHO. [Fotografía].

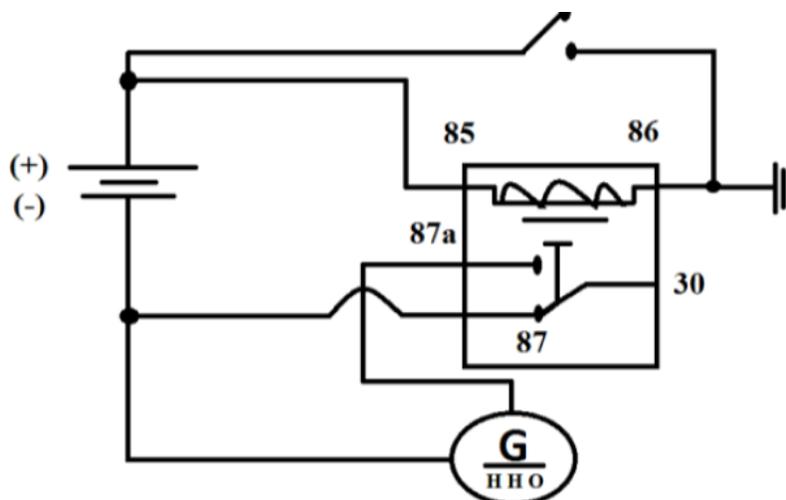
Revista UIS Ingenierías. <https://bit.ly/3MQOdAy>

Sistema eléctrico

El reactor de hidrógeno es alimentado por la batería del vehículo, el circuito posee un fusible que protege al sistema de los elevados picos de corriente. Consecuentemente la corriente llega al relé que es activada y desactivada por un interruptor accesible al conductor. La corriente llega al generador de hidrógeno, para separar los átomos del agua destilada combinada con hidróxido de potasio. (Duque & Masaquiza, 2013, p. 32)

Figura 10

Diagrama eléctrico del sistema de generación de HHO



Nota. Reyes et al. (2018). Circuito instalación del generador HHO. [Fotografía]. UPSE.

<https://bit.ly/36hiNTs>

Parámetros matemáticos para la generación de hidrógeno

Ley de Faraday

Las leyes que enunció Faraday aportan a un cálculo de obtención de sustancias, Chamkin (2012) menciona que:

- 1) El peso de una sustancia depositada es proporcional a la intensidad de la corriente (o sea, al número de electrones por segundo) y al tiempo que ésta circula.
- 2) el peso de una sustancia depositada durante la electrólisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia. (p.2)

De modo que E es el coeficiente equivalente electroquímico del elemento es:

Ecuación 23

Ley de Faraday

$$E = M/v.F$$

Donde:

M es la masa en gramos de un mol de la sustancia depositada.

v en la valencia del ión correspondiente.

F la constante universal de Faraday.

Potencia eléctrica

Una idea de Cruz 2010 leída en una publicación de Velástegui y Jesús en (2015):

Al respecto, “Es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo, es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La potencia eléctrica se representa con la letra P y la unidad de medida es el Vatio (Watt)” (pp. 18-19).

Capítulo III

Instalación del sistema de generación de hidrógeno de celda seca

Características del motor de combustión interna OPEL 1.8 L.

El vehículo al cual se implementa el generador de hidrógeno de celda seca y se realiza las respectivas pruebas para el estudio de los parámetros característicos de desempeño es un OPEL CORSA EVOLUTION 1800 cc GLS 2005, el cuál presenta la siguiente ficha técnica.

Tabla 5

Ficha técnica Vehículo OPEL CORSA 1.8 L

Prestaciones y dimensiones		
Alimentación	Inyección	Inyección multipunto
	Combustible	Nafta
	Depósito de combustible	Principal
	Capacidad	44 L
	Tipo de combustible	Sin plomo
	Motor	Centímetros cúbicos
	Litros	1.8
	Diámetro Cilindro	80.5 mm
	Carrera	88.2 mm
	Relación de compresión	10.5
	Cilindros	4
	Configuración	En línea
	Orientación	Transversal
	Distribución	Un árbol de levas
	Válvulas por cilindro	2

Prestaciones y dimensiones		
	Código motor	Z18XE
Normas de emisiones	Normativa	EU 3
	Nivel CO2 combinado	185 g/km
Potencia	Potencia máxima	102 HP
	Régimen de potencia máxima	6000 rpm
	Par máximo	165 Nm
	Régimen de par máximo	4600 rpm
Consumo	Urbano	11 litros / 100 km
	Extraurbano	5.8 litros / 100 km
	Combinado	7.7 litros / 100 km

Nota. La ficha técnica detalla las prestaciones del vehículo Opel Corsa 1.8 L.

Características del generador de hidrógeno de celda seca

El generador de hidrógeno de celda seca consta de varios elementos para su funcionamiento, que presenta las siguientes características:

Tabla 6

Ficha técnica del generador de hidrógeno de celda seca

Características	Detalles
Medidas del condensador Standart	18 cm x 18 cm x 6 cm
Peso	3 kilogramos
Voltaje de Funcionamiento	12 voltios – 24 voltios
Consumo de Corriente	5 amperios

Nota. La tabla indica características del condensador o reactor de hidrógeno.

Además, el generador contiene los siguientes accesorios y detalles mostrados en la tabla 7.

Tabla 7

Accesorios del generador de hidrógeno de celda seca.

Accesorios	Detalles
Material electrodo	Acero 316 L
Material aislante	Policarbonato 5 mm
Tapas de hermeticidad	H R 1/8
Depósito de electrolito	1 plástico inyectado
Trampas de agua	2 decantadores
Manejo de corriente	Mediante elevador 12 V – 24 V
Cableado	Cable calibre 12
Protección de cableado	Coraza plástica de ¼
Electrolito	Agua + Refrigerante + bicarbonato
Duración galón de electrolito	4000 km

Accesorios	Detalles
Alimentación al motor	Filtro de aire de admisión
Duración de la instalación	8 horas
Ciclos de recarga del electrolito	300 kilómetros de recorrido
Revisión obligatoria y gratuita	6 meses
Renovación del sistema	1 año
Garantía	1 año
Vida útil del sistema	8 años

Nota. La tabla indica los accesorios del sistema de generación de hidrógeno de celda seca.

Seguridad y precauciones de instalación del reactor de hidrógeno de celda seca.

Para la instalación del generador de hidrógeno de celda seca en el vehículo es necesario tomar en cuenta el estado de cada uno de los componentes del sistema como mangueras, depósitos, cables eléctricos y el mismo reactor.

Tomar precauciones al momento de manipular los reactivos como el Hidróxido de Potasio y Bicarbonato de Sodio para preparar la mezcla, usando guantes de protección personal, gafas protectoras y mascarilla.

Debido a alta explosividad que tiene el hidrógeno, en sus diferentes pruebas de funcionamiento, es necesario utilizar tapones de oídos por el excesivo ruido generado al momento de entrar en contacto con una chispa.

En la instalación mecánica del sistema es necesario que el reactor de hidrógeno se ubique de manera vertical para su correcto funcionamiento. Consecuentemente la conexión eléctrica es lo último que se realizará, tomando en cuenta la señal de salida del generador que funcionará con la señal de contacto del vehículo.

Instalación del reactor

Dentro del sistema de generación de hidrógeno de celda seca, uno de los elementos más importantes es el reactor de hidrógeno, el cual debe de ir ubicado de manera correcta en el habitáculo del vehículo. Las demás conexiones con sus depósitos, filtros y partes eléctricas se redactan a continuación.

Pasos para la conexión mecánica del sistema.

El reactor como pieza principal y de mayor dimensión y peso, toma prioridad en la instalación en el compartimento del motor, sobre una superficie sólida, mediante placas metálicas para su sujeción de forma vertical, fuera de zonas de alta temperatura, en este caso sobre el compacto junto a la caja de fusibles, y con los conectores para la fuente de energía como se muestra en la figura 11.

Figura 11

Reactor de hidrógeno de celda seca



Nota. El reactor es el equipo de color azul instalado entre la caja de fusibles y depósito de aceite de dirección.

Para la fijación del depósito del electrolito se instala en un área que permita la visibilidad y llenado de la solución, en este caso junto al depósito de refrigerante del motor, como se visualiza en la figura 12.

Figura 12

Depósito del electrolito

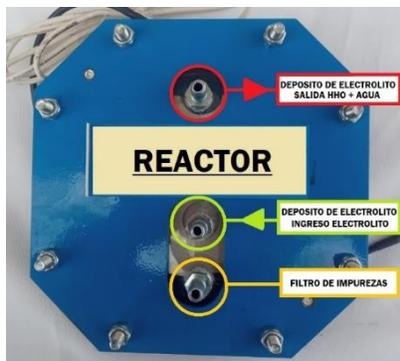


Nota: El depósito de electrolito es de color blanco y tapa amarilla.

En el reactor se encuentra tres ductos como se muestra en la figura 13, donde consta el ingreso del electrolito, la salida del HHO + AGUA y el ducto para filtrar impurezas. El ducto de color rojo va conectado al ducto superior del depósito de electrolito, el ducto color verde va conectado al ducto inferior del depósito del electrolito y el ducto color amarillo va conectado al filtro de impurezas

Figura 13

Ductos del reactor



Nota. La figura indica los ductos detallados del reactor de hidrógeno.

La instalación de la trampa de agua se realizó en los pernos de la estructura del reactor, como se muestra en la figura 14, mediante una placa metálica y sujetadores plásticos. La conexión de la trampa de agua va entre el depósito del electrolito y el filtro de HHO, además es un elemento bidireccional.

Figura 14

Trampa de agua



Nota. La figura indica el envase de la trampa de agua.

El filtro de HHO se instaló en la parte posterior del cuerpo de aceleración, el cual es el último filtro antes de la entrada del gas al motor, permitiendo la producción de HHO libre de impurezas.

Figura 15

Filtro de HHO



Nota. En la imagen se observa el filtro de HHO encerrado en el círculo de color verde.

Para la toma de vacío del cuerpo de aceleración se implementa un acople en T que se conecta al filtro de HHO indicada en la figura 16.

Figura 16

Acople hacia la toma de vacío



Nota. La figura indica la toma de vacío con el acople en T.

Pasos la conexión eléctrica del sistema

Para la conexión eléctrica se parte desde la batería, el cual presenta un voltaje de 12 voltios, misma que será la fuente de alimentación para el generador HHO como se observa en la figura 17.

Figura 17

Conexión Batería



Nota. Conexión eléctrica final del generador de hidrógeno a la batería.

Para la activación es necesario utilizar un relevador como se observa en la figura 18, con el objetivo de activar el reactor únicamente cuando el motor se va a poner en marcha, para lo cual se necesita una señal proveniente del vehículo.

Figura 18

Conexión de relevador



Nota. El relevador está sujeto a una base rígida del compartimento del motor.

Para obtener la señal se necesita de un portafusibles expansor que es un elemento que permite duplicar la señal de activación para accesorios adicionales del vehículo, sin alterar la originalidad de esta como se indica en la figura 19.

Figura 19

Portafusibles expansor



Nota. El portafusibles expansor es un elemento protector de circuitos.

La señal de activación para el reactor es la duplicada del encendedor, cuyo fusible se encuentra en la fila 5, columna 4, como se muestra en la figura 20.

Figura 20

Duplicado de señal encendedor



Nota. El encendedor es activado mediante el switch del vehículo, en la posición (II).

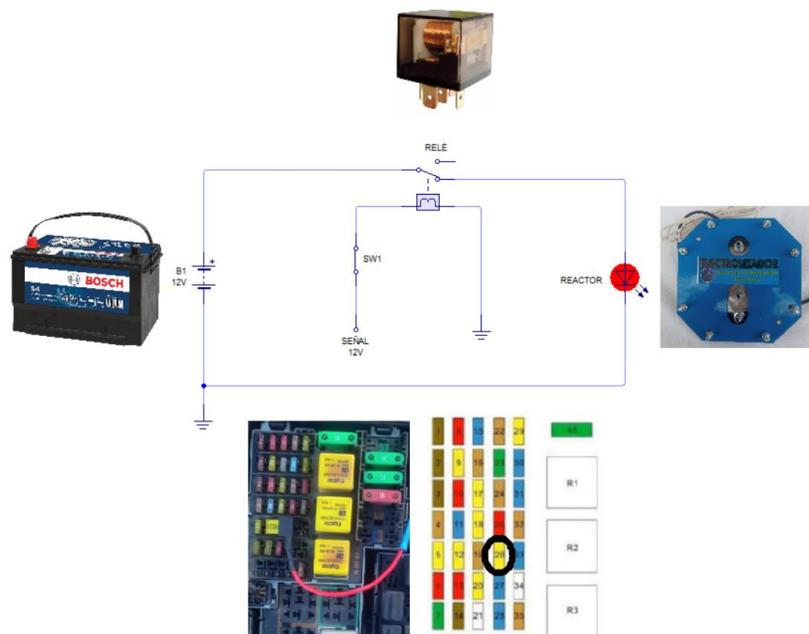
Una vez que se obtiene la fuente de alimentación que es controlada mediante el switch de arranque del vehículo, se conecta hacia la parte positiva del reactor el cual posee dos bornes, un positivo y negativo, de color blanco y negro respectivamente, como se indica en la figura 21, la salida del relé se conecta al cable blanco del reactor y el negro hacia la carrocería del vehículo, cumpliendo la función de masa.

Figura 21

Bornes del reactor



Nota. Bornes del reactor, cable negro a tierra y blanco a positivo de la batería.

Figura 22*Diagrama eléctrico*

Nota. Diagrama del circuito de conexión del generador a la batería.

En la figura 22 se puede observar un diagrama sintetizado del circuito de conexión del reactor de HHO, comenzando desde la batería de 12 V, al relé del mismo voltaje, la señal obtenida desde la fusilera del vehículo, y el reactor representado por un led.

Preparación de la mezcla de agua destilada y el hidróxido de potasio del reactor.

Para la preparación del electrolito, se necesita de 1/2 de galón de agua, puede ser destilada o no, se agrega 10 gramos de bicarbonato y 20 gramos de hidróxido de potasio hasta homogenizar la mezcla. Es necesario agregar 2 ml de refrigerante de color a la mezcla para al ponerla en el depósito y observar posibles fugas que puedan existir en el sistema.

Figura 23

Electrolito del sistema generador de hidrógeno.



Nota. La figura indica la incorporación del electrolito al depósito.

Matematización de la producción del HHO

Para la matematización de la producción de hidrógeno dado por el generador de celda seca se necesita los siguientes datos indicados en la tabla 8.

Tabla 8

Características del generador de hidrógeno.

Parámetros	Valor	Unidad
Número de placas (n)	6	---
Consumo de voltaje del generador	12	V
Consumo de amperaje	5	A
Separación entre placas	5	mm

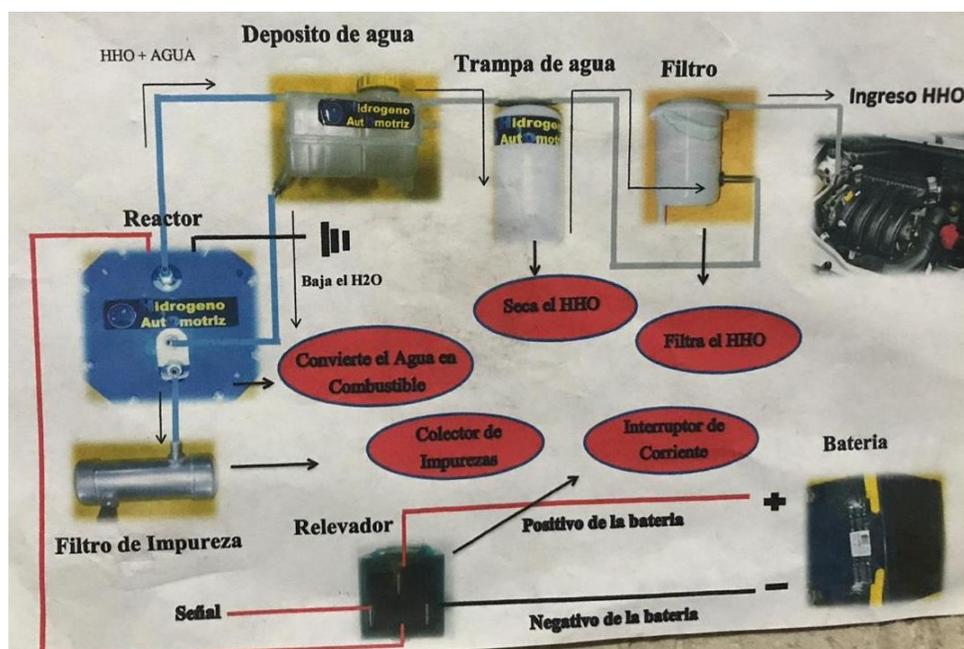
Nota. Los datos son tomados como referencia de la tabla 6.

Proceso de Producción de hidrógeno.

Una vez realizada la instalación del sistema, el proceso esquemático de producción de hidrógeno se detalla muy fácilmente en la siguiente figura 24.

Figura 24

Proceso de producción de hidrógeno del sistema



Nota. La imagen detalla el proceso por el cual pasa el electrolito para producir HHO.

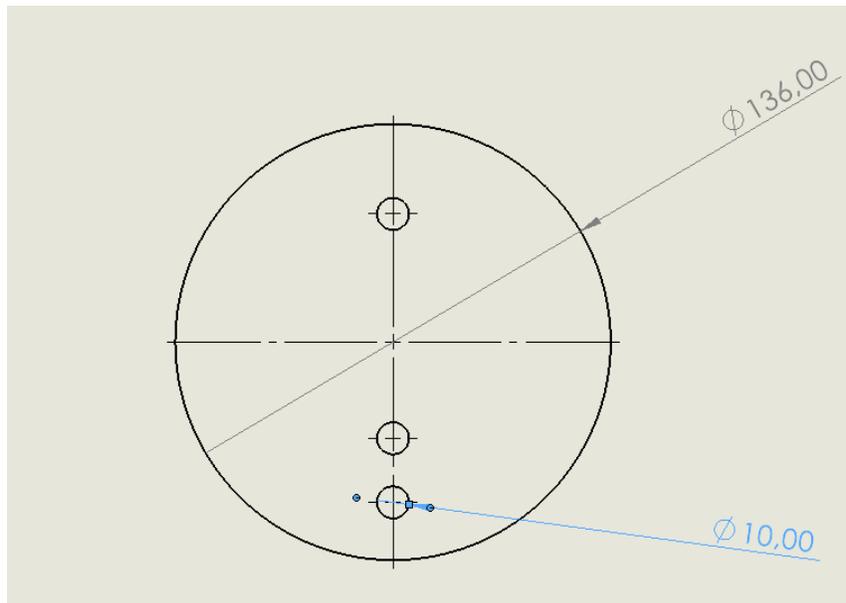
Al momento de ingresar la mezcla o electrolito en el depósito, mediante las mangueras se traslada al reactor de hidrógeno, el cual realiza el proceso de electrólisis el cual consta de un filtro de impurezas que limpia cualquier suciedad que tenga el electrolito. Como el hidrógeno es muy ligero, circula por el depósito hasta llegar a la trampa de agua que seca el HHO seguido por un filtro para finalmente ingresar HHO al motor por el múltiple de admisión a través de la toma de vacío.

Estimación del área de placas.

Para realizar el cálculo del área de las placas del generador se requiere del siguiente plano el cual indica las dimensiones de la placa.

Figura 25

Dimensiones de la placa del generador



Nota. Las dimensiones de la placa están en milímetros.

Se calcula el área total del círculo realizando la conversión de mm a cm:

$$A_1 = \pi r^2 = \pi \left(\frac{136 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} * 1 \text{ cm} \right)^2 = 581.06 \text{ cm}^2$$

Se calcula el área de los agujeros de la placa, en este caso son 3.

$$A_2 = \pi r^2 = \pi \left(\frac{10 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} * 1 \text{ cm} \right)^2 = 3.14 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total agujeros}} = A_2 * 3 = 3.14 \text{ cm}^2 * 3 = 9.42 \text{ cm}^2$$

Obteniéndose el área total de la placa de una placa.

$$A_T = A_1 - A_{total\ agujeros}$$

$$A_T = 581.06\ cm^2 - 9.42\ cm^2 = 571.64\ cm^2$$

Para calcular el área total de todas las placas se multiplican por el número que tiene el generador.

$$A_{TP} = A_T * 6$$

$$A_{TP} = 571.64\ cm^2 * 6 = 3429.84\ cm^2$$

Estimación del flujo de gas HHO

Para ello, se encuentra la carga eléctrica generada por el reactor en un minuto de funcionamiento, el mismo consume 5 A de corriente.

$$Q = I * t$$

$$Q = 5\ A * 60\ s$$

$$Q = 300\ Coulomb$$

Se halla el peso equivalente del hidrógeno en moles, en donde su peso atómico es de 1 g y su valencia en moles de 2.

$$E = \frac{P_a}{V} = \frac{1\ g}{2\ mol} = 0.5\ mol$$

Se aplica la fórmula de la Ley de Faraday para encontrar la masa de hidrógeno producida.

$$m = \frac{E * Q}{F}$$

$$m = \frac{0.5\ mol * 300\ C}{96500\ \frac{C}{mol}}$$

$$m = 1.55 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Se calcula el volumen de gas hidrógeno generado por una celda, esto se consigue con la fórmula de los gases ideales, en condiciones de temperatura y presión normales.

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

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

$$V_{H_2} = \frac{1.55 \times 10^{-3} \text{ mol} * 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} * 298 \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V_{H_2} = 0.0378 \text{ l por celda}$$

$$V_{H_2} = 37,8 \text{ ml}$$

Y el volumen total de hidrógeno generado, se multiplica por el número de celdas del reactor:

$$V_{totalH_2} = 6 * 37.8 \text{ ml}$$

$$V_{totalH_2} = 226,8 \text{ ml}$$

El gas de oxígeno producido en volumen es la mitad del volumen del gas de hidrógeno, por lo que el flujo de gas HHO suministrado por el reactor es:

$$V_{O_2} = \frac{V_{totalH_2}}{2} = \frac{226.8 \text{ ml}}{2} = 113.4 \text{ ml}$$

$$V_{HHO} = V_{totalH_2} + V_{O_2}$$

$$V_{HHO} = 226.8 \text{ ml} + 113.4 \text{ ml}$$

$$V_{HHO} = 340.2 \text{ ml}$$

Tabla 9

Resumen de la matematización de producción de hidrógeno.

Parámetros	Valor	Unidad
Área de una placa (A_T)	571.64	cm^2
Área total de la placa (A_{TP})	3429.84	cm^2
Volumen de hidrogeno (V_{H_2})	226,8	ml
Volumen de oxígeno (V_{O_2})	113.4	ml
Producción total de HHO (V_{HHO})	340.2	ml

Nota. La tabla indica teóricamente la producción total de hidrógeno dada por el generador de celda seca.

Puesta punto del sistema

Para la puesta a punto del sistema de generación de hidrógeno de celda seca se debe tomar en cuenta que el vehículo este en perfectas condiciones de funcionamiento, verificando los inyectores, filtro del aire, filtro de combustible, presión de bomba y demás sensores y actuadores.

En este caso no es necesario un interruptor para activar el generador de hidrógeno de celda seca, puesto que su funcionamiento se genera al encender el vehículo y se desactiva al apagarlo, no existe tampoco ningún problema si se desea poner un interruptor. De ahí la importancia de ser un generador de hidrógeno de celda seca que utiliza 5 amperios para su funcionamiento detallados en la ficha técnica del reactor.

Se puede verificar si el sistema está generando hidrógeno retirando la manguera de salida de HHO del reactor y se deposita el mismo en agua con detergente, si este genera burbujas de gas se combustionará al tener contacto con una chispa de fuego o cerrillo.

Mantenimiento del sistema de generación de hidrógeno.

Dentro del mantenimiento del sistema de generación de hidrógeno de celda seca, el reactor es uno de los elementos a realizar su mantenimiento preventivo adecuadamente de la siguiente manera:

- Antes de limpiar el generador, se debe apagar el motor y desconectar la conexión del sistema de la batería, si un caso utiliza un interruptor, solo es necesario apagarlo. Con ello, se evita un cortocircuito generando daños al reactor de hidrógeno.
- Los cables eléctricos, mangueras, el depósito, burbujeador, secador y filtros se deben encontrar en perfecto estado. Si uno de estos necesitará un recambio o limpieza, se desconecta el sistema de la batería o se apaga el mismo con el interruptor.
- La limpieza total del sistema se realiza cada 4 meses o cuando en su defecto en el reactor existan sulfataciones al inicio de las conexiones y haya obstrucción en las mangueras debido a la oxidación del electrolito. Para ello, se desconecta el tubo que ingresa HHO al colector de admisión del vehículo y se vacía el depósito del electrolito para agregar agua con vinagre en el mismo. Aquella mezcla debe funcionar en el sistema durante 30 minutos para su limpieza, nuevamente se vacía el depósito de la mezcla de agua con vinagre y se lo reemplaza por el electrolito.
- Los 2 ml de refrigerante de color en la mezcla del electrolito son necesarios para la verificación de fugas en el sistema y si se desea ser más exacto las mangueras pueden ser cubiertas con una solución jabonosa para encontrar burbujas de hidrógeno que puedan estar escapando.
- El depósito del electrolito debe de ser llenando por lo menos las 3/4 partes de este, nunca se debe dejar el depósito vacío

Capítulo IV

Pruebas y análisis de resultados de los parámetros característicos de desempeño

Equipos de Prueba

Dentro de los equipos de prueba para el análisis de la potencia, torque, consumo de combustible y emisión de gases contaminantes del vehículo corsa Evolution 1.8 L, se encuentra el dinamómetro automotriz, el analizador de gases y el multímetro automotriz.

Dinamómetro Automotriz

Cerecero (2012) describe que, el dinamómetro o banco dinamométrico, es un dispositivo para medir fuerzas características de un vehículo en específico, permitiendo obtener valores de los parámetros característicos como: torque, potencia, velocidad, consumo, entre otros, acorde a las especificaciones del equipo y condiciones específicas del caso. El principio de funcionamiento del dinamómetro es absorber la potencia generada por un motor, lo cual está ligada a la industria automotriz, permitiendo obtener mediciones de los parámetros característicos de motores de combustión interna, motores eléctricos, turbinas entre otros. (p. 14)

Tabla 10

Especificaciones técnicas del dinamómetro de rodillos Motorroll Md200hp

Características del dinamómetro de rodillos Motorroll Md200hp	
Fabricante	Motorroll
País de origen	Argentina
Modelo	Md200hp
Número de serie	Md0037
Potencia máxima	200 hp
Tipo de dinamómetro	De rodillo con freno hidráulico

Nota. En la tabla se presenta las especificaciones técnicas y de identificación del dinamómetro Motorroll Md200hp. Recuperado de (Poalacín & Vilaña, 2021)

Figura 26

Dinamómetro de rodillos MOTORROLL (MD200HP)



Nota: En la figura se observa al vehículo sobre los rodillos del dinamómetro de inercia.

Para una toma de datos más fiable, se necesita cumplir parámetros como: Posición adecuada del vehículo, ventilador para disminuir la temperatura generada por el motor a causa del esfuerzo realizado, interfaz conectada adecuadamente hacia el computador y el equipo de medición.

Analizador de gases

Herrera (2007) define que, el opacímetro CARTEK a través del software de inspección sirve para analizar las emisiones contaminantes de motores a gasolina, GNV y diésel, además que cuenta con captadores de RPM y temperatura. (pp. 9-10)

Figura 27

Analizador de gases CARTEK



Nota. En la figura se observa el equipo analizador de gases contaminantes de la marca CARTEK.

Multímetro automotriz

Donado (2021) estipula que el multímetro automotriz es un equipo portátil, usado para medir valores eléctricos, como, consumo de corriente de distintos sistemas constituyentes en un vehículo.

Tabla 11

Especificaciones de precisión del multímetro automotriz.

Parámetros	Rango	Resolución	Precisión
	200mV	0.1mV	
Voltaje de	2V	0.001V	
corriente	20V	0.01V	± (0.5% lectura +3)
continua	200V	0.1V	
	600V	1V	

Parámetros	Rango	Resolución	Precisión
Voltaje de corriente alterna	200V	0.1V	± (1.2% lectura +5)
	600V	1V	
Corriente continua	20mA	0.01mA	± (1.2% lectura +3)
	200mA	0.1mA	
	10A	0.01A	
Resistencia	200Ω	0.1Ω	± (1.0% lectura +3)
	2kΩ	0.001kΩ	
	20kΩ	0.01kΩ	
	200kΩ	0.1kΩ	
	2MΩ	0.001MΩ	
	20MΩ	0.01MΩ	

Nota. en esta tabla se observa la limitación y precisión del multímetro INGCO DM200.

Pruebas de generación de hidrógeno

Es importante verificar la generación de hidrógeno por parte del reactor, antes de la filtración e ingreso al múltiple de admisión del motor, con la finalidad de corregir posibles fallas con el sistema interno del reactor.

Instalar el reactor en el compartimento del vehículo con su respectiva instalación eléctrica, como se observa en la figura 28.

Figura 28

Posición del reactor de hidrógeno.



Nota. En la figura se observa el reactor instalado en el compartimento del motor.

Verificar el sistema eléctrico, el nivel de reactivo en el depósito y su conexión de mangueras, desconectar el ducto primario del reactor (salida del hidrógeno), el cual se encuentra antes de la conexión con el sistema secante.

Figura 29

Ducto salida primaria de hidrógeno



Nota. En esta figura se observa el ducto por donde sale las partículas de HHO, antes de la filtración.

En una solución jabonosa sumergir el ducto de la salida del HHO, con la finalidad que el gas quede atrapado en las burbujas generadas, como se muestra en la figura.

Figura 30

Solución jabonosa



Nota. En la imagen se observa un método de retención temporal del hidrógeno, mediante la solución jabonosa.

Para la verificación de la explosividad del HHO, detonar mediante una encendedor o chispero directamente en las burbujas.

Figura 31

Detonación del gas HHO.



Nota. En la imagen se observa la detonación del HHO, el cual se recomienda realizar en ambientes abiertos y aislado por su alta explosividad.

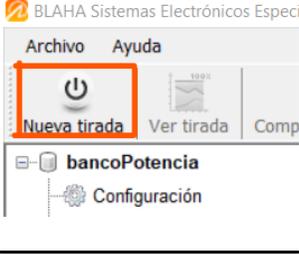
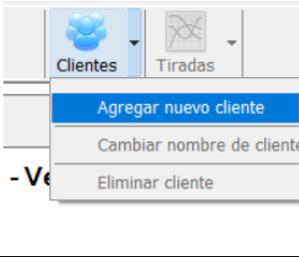
Pruebas de desempeño del motor con el dinamómetro.

Para realizar la prueba de torque y potencia se debe seguir los siguientes pasos para el uso del dinamómetro MOTORROLL Md 200hp.

Tabla 12

Puesta a punto del dinamómetro.

Descripción	Imagen
Realizar la conexión de la interfase, computador y el sistema de rodillos.	
Verificar el nivel de agua en el depósito para la bomba.	
Colocar el vehículo sobre los rodillos, de una forma estable y centrada.	
Instalar el ventilador frente y cerca del radiador del vehículo.	
Ejecutar el software MOTORROLL POWER TEST.	

Descripción	Imagen
<p>Colocar el motor a temperatura óptima de trabajo, entre 93 y 95 Celsius.</p>	
<p>Poner en marcha el vehículo, en 3er cambio de marcha.</p>	
<p>En el software seleccionar la opción (nueva tirada)</p>	
<p>Presionar en la casilla clientes, y agregar un nuevo cliente, con su respectiva identificación.</p>	
<p>Seguidamente en la zona sensores y salidas, seleccionar la opción RPM, para calibrar a 3000 revoluciones del motor.</p>	

Descripción	Imagen												
<p>Encender la bomba hidráulica y regular la perilla de caudal, el cual se gira 3 vueltas para su mejor funcionamiento.</p>													
<p>Revisar datos de entrada por parte del fabricante del vehículo.</p>	<table border="1"> <tr> <td>POTENCIA</td> <td>Potencia máxima</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Régimen de potencia máxima</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Par máximo</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Régimen de par máximo</td> <td></td> </tr> </table>	POTENCIA	Potencia máxima			Régimen de potencia máxima			Par máximo			Régimen de par máximo	
POTENCIA	Potencia máxima												
	Régimen de potencia máxima												
	Par máximo												
	Régimen de par máximo												
<p>Durante la prueba, acelerar el motor a 5600 revoluciones, de acuerdo con el fabricante para conseguir la potencia máxima.</p>													
<p>Se obtiene valores y gráficas de la medición.</p>													

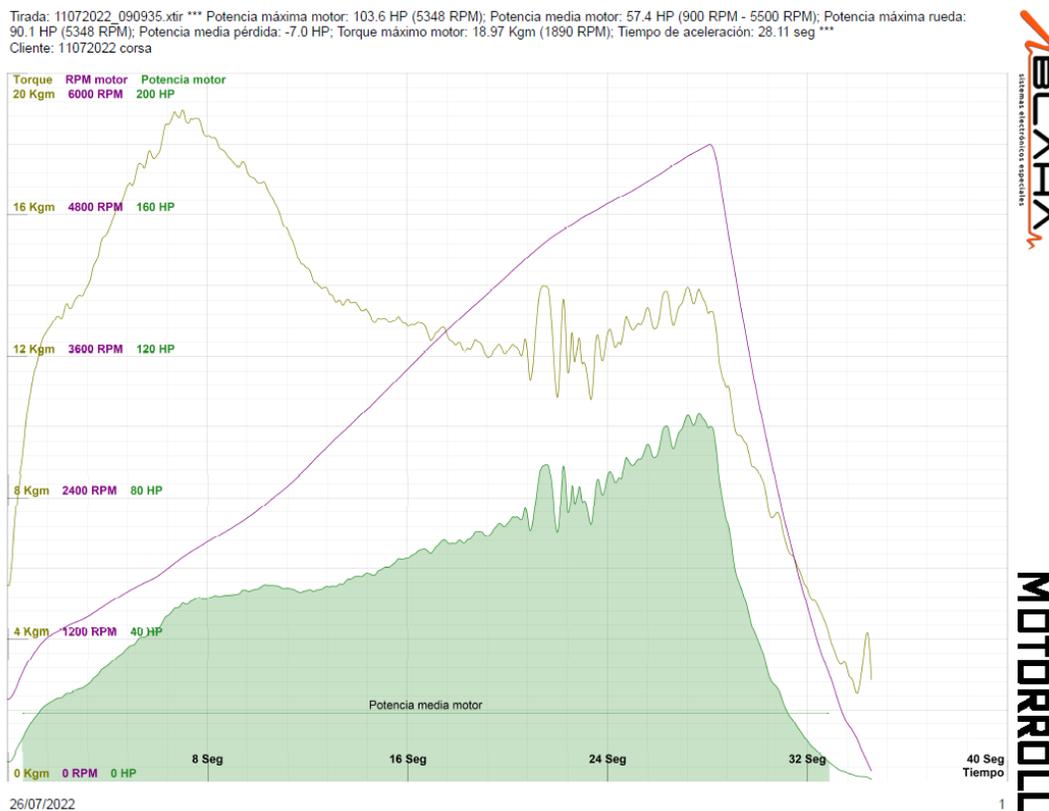
Nota. La tabla indica los pasos necesarios para calibrar el dinamómetro MOTORROLL.

Resultados de desempeño con gasolina extra.

Realizada la calibración del dinamómetro automotriz MOTORROLL, se procede a obtener las gráficas y tablas de torque y potencia del vehículo Opel Corsa 1.8 L con gasolina extra de 87 octanos que se muestra en la figura 32.

Figura 32

Gráfica potencia y torque con gasolina extra.



Nota. La figura indica los valores máximos alcanzados de potencia y torque generada por el programa de Motorroll power test.

Los datos obtenidos en la tabla con gasolina extra de 87 octanos detallan el tiempo de tirada desde los 688 rpm a 5349 rpm durante 28.11 segundos.

Tabla 13*Valores de potencia y torque con la utilización de gasolina extra*

Tiempo Seg	Torque Kgm	RPM motor	Potencia HP
0,00	5,51	688	5,30
1,39	12,40	1170	20,30
2,77	13,64	1342	25,60
4,15	15,71	1514	33,20
5,53	17,37	1679	40,70
6,92	18,77	1874	49,10
7,03	18,97	1891	50,10
8,30	18,17	2057	52,20
9,68	17,12	2238	53,50
11,06	15,70	2473	54,20
12,45	14,02	2754	53,90
13,83	13,53	3031	57,30
15,21	13,02	3317	60,30
16,60	12,93	3614	65,30
17,98	12,33	3894	67,10
19,36	12,02	4158	69,80
20,74	12,47	4426	77,10
22,13	12,00	4657	78,10
23,51	12,03	4831	81,20
24,89	12,91	4993	90,00
26,28	13,81	5169	99,70

Tiempo Seg	Torque Kgm	RPM motor	Potencia HP
27,66	13,87	5345	103,50
27,69	13,87	5349	103,60
28,11	13,26	5394	99,90
29,04	10,27	4401	63,10
30,42	7,79	2846	31,00
31,81	5,72	1628	13,00
33,19	3,47	710	3,40
34,00	2,46	352	1,20
34,57	2,84	82	0,30

Nota. La tabla indica los valores de potencia y torque máximos a un régimen rpm.

Al utilizar gasolina extra, el torque máximo de 18.97 Kg-m se consigue a 1891 rpm durante los primeros 7.03 segundos de la tirada, en donde la potencia alcanzada a ese régimen es de 50.10 HP. La potencia máxima de 103.60 HP se consigue a los 5349 rpm durante los 27.69 segundos, en donde el torque disminuye a 13.86 Kg-m.

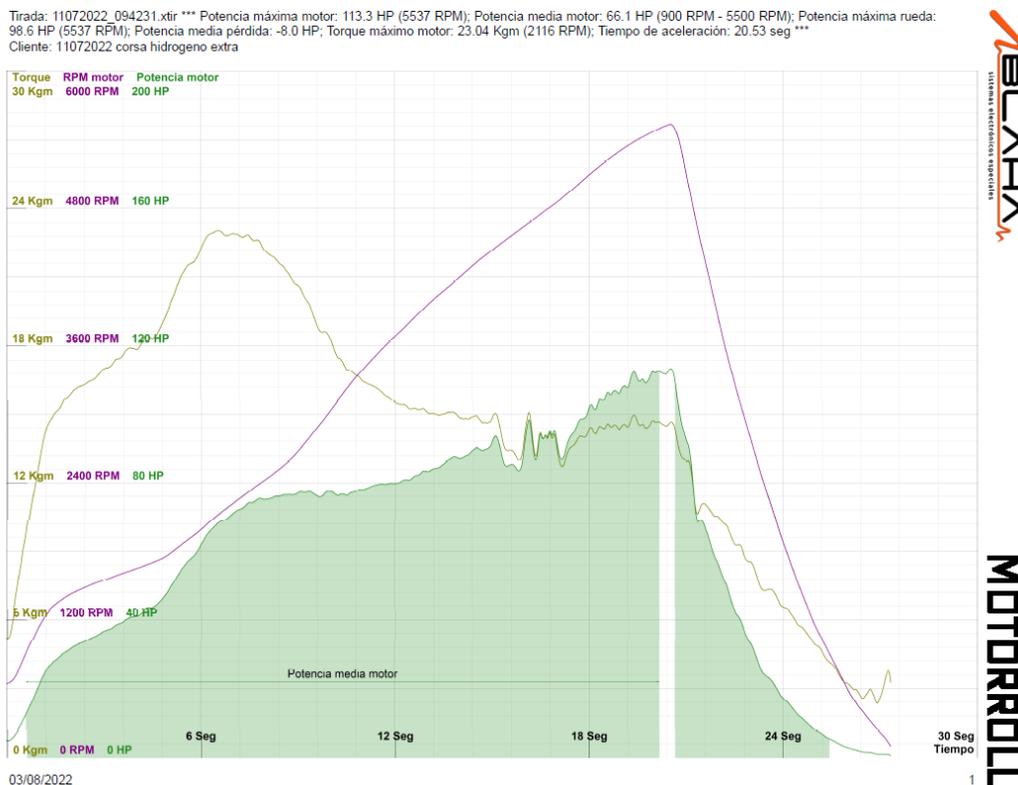
Considerando el modo crucero de conducción a 2473 rpm, la potencia del motor llega a los 54.20 HP con un torque de 15.70 Kg-m, existiendo un aumento de potencia de 4.10 HP y una disminución de torque de 5.11 Kg-m. En este caso, los valores encontrados cumplen con los parámetros de la ficha técnica del vehículo detallados en la tabla 5.

Resultados de desempeño con gasolina extra y HHO.

Al implementar el ingreso de HHO al motor de combustión interna con gasolina extra de 87 octanos, se obtiene la gráfica de potencia y torque mostrada en la figura 33.

Figura 33

Gráfica de potencia y torque con gasolina extra + HHO.



Nota. La figura indica los valores máximos alcanzados de potencia y torque generada por el programa Motorroll Power Test.

La tabla indica los datos obtenidos con gasolina extra de 87 octanos y el ingreso de HHO al motor de combustión interna que detallan el tiempo de tirada desde los 642 rpm a 5537 rpm durante 20.54 segundos.

Tabla 14

Valores de potencia y torque con la utilización de gasolina extra + HHO.

Tiempo seg	Torque Kgm	RPM motor	Potencia HP
0,00	5,16	642	4,60
1,10	13,68	1192	22,80
2,19	16,14	1449	32,70
3,28	17,20	1572	37,80
4,38	18,44	1684	43,40
5,47	21,19	1866	55,20
6,54	23,04	2117	68,10
6,56	23,03	2122	68,30
7,66	22,59	2360	74,50
8,75	21,10	2597	76,50
9,84	18,59	2970	77,10
10,94	16,58	3366	77,90
12,03	15,50	3683	79,80
13,12	15,05	3985	83,80
14,22	14,80	4250	87,90
15,31	13,93	4500	87,50
16,40	13,38	4726	88,40
17,50	13,59	4967	94,30
18,59	14,57	5226	106,40
19,68	14,54	5427	110,20
20,53	14,65	5538	113,30

Tiempo seg	Torque Kgm	RPM motor	Potencia HP
20,54	14,65	5537	113,30
20,78	13,50	5410	102,00
21,87	10,52	4009	58,90
22,96	8,54	2821	33,70
24,06	6,50	1839	16,70
25,15	4,74	1058	7,00
26,24	2,96	481	2,00
26,92	2,33	241	0,80
27,34	3,25	92	0,40

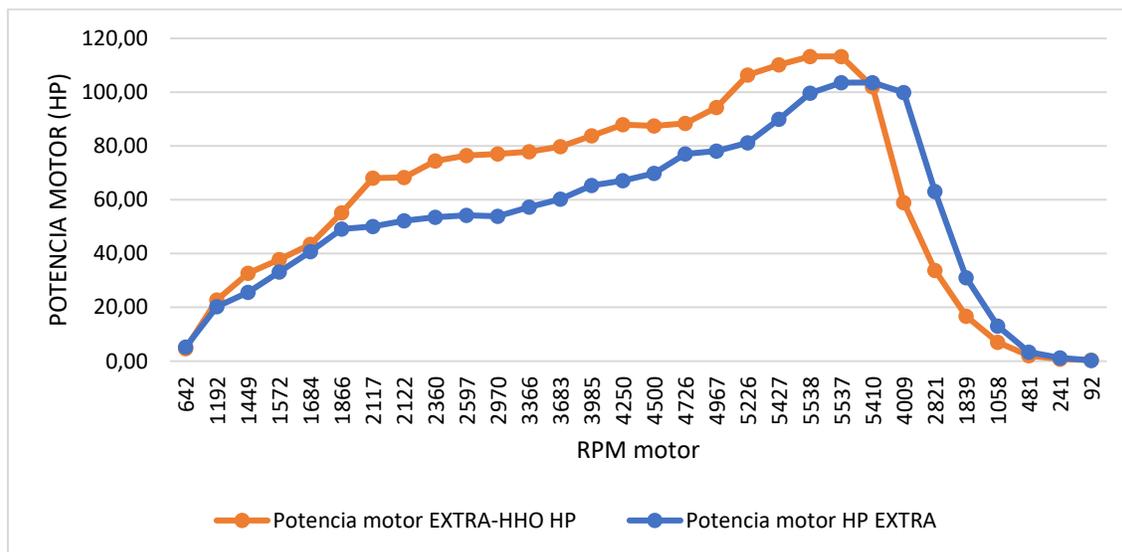
Nota. La tabla indica los valores de potencia y torque máximos a un régimen de rpm.

Durante los primeros 6.54 segundos de la tirada, el torque máximo obtenido es de 23.04 Kg-m a 2117 rpm, en donde la potencia alcanzada a ese régimen es de 68.10 HP. La potencia máxima de 113.30 HP se alcanza a 5537 rpm durante los primeros 20.54 segundos de la tirada en la prueba con un torque de 14.65 Kg-m. Para mayor detalle del análisis de los resultados se realiza una gráfica de relación de potencia y torque entre el uso de los combustibles con y sin la utilización de hidrógeno.

Análisis y relación potencia con combustible extra vs extra + HHO

Figura 34

Relación de potencia gasolina extra vs gasolina extra + HHO.



Nota. (Color naranja) Potencia con extra + HHO. (Color azul) Potencia con extra.

Al analizar la relación de potencia con los valores más similares en revoluciones por minuto detallados en las tablas 13 y 14, a 1878 rpm la potencia pasa de 50.1 hp a 55.2 hp con el uso de combustible extra + hidrógeno, con un aumento de 5.1 hp en ese punto. A 5400 rpm la potencia aumenta de 103.6 hp a 110.2 hp con el uso de combustible extra + hidrógeno, con un aumento de 6.6 hp en ese punto de la gráfica. Se detalla la variación porcentual de aumento en la siguiente tabla.

Tabla 15

Variación porcentual de potencia (hp) con gasolina extra + HHO.

rpm	Extra (hp)	Extra + HHO (hp)	Variación
1878	50,1	55,2	9,24%
5486	103,6	110,2	6%

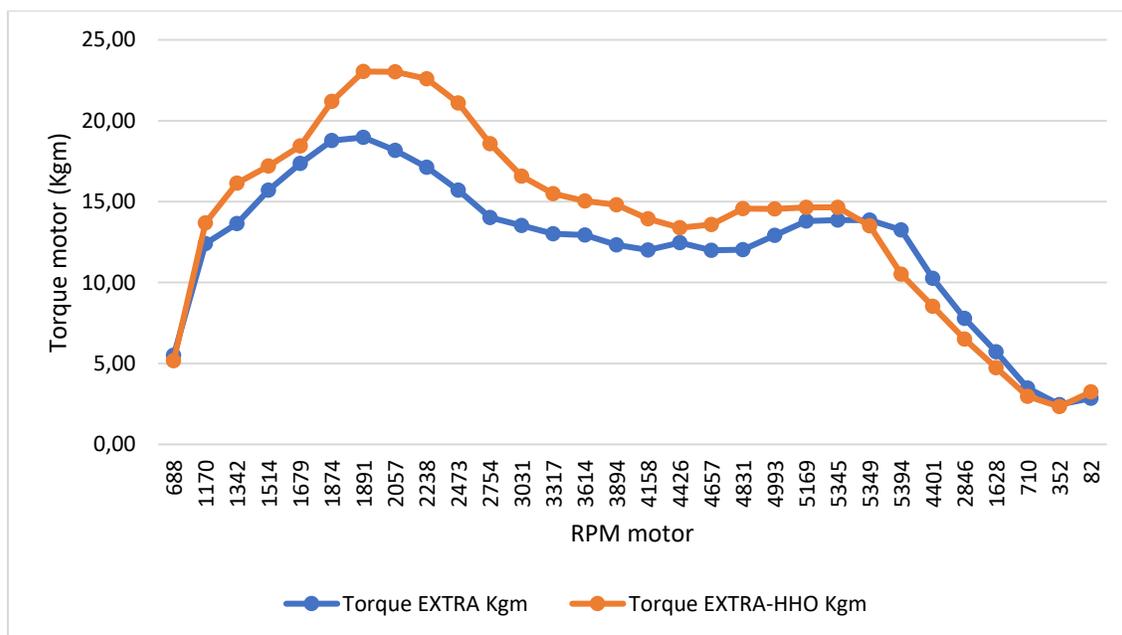
Nota. Valores de potencia en hp.

Al utilizar gasolina extra con hidrógeno, el aumento de potencia a 5486 rpm es de un 6%, en otro punto distinto a 1878 rpm el aumento llega a una variación de 9.24% con respecto al uso del combustible extra.

Análisis y relación torque con combustible extra vs extra + HHO

Figura 35

Relación de torque gasolina extra vs gasolina extra + HHO.



Nota. (Curva azul) Torque con gasolina extra. (Curva naranja) Torque extra + hidrógeno.

Al analizar la relación de torque con los valores más similares en revoluciones por minuto detallados en las tablas 13 y 14, a 1878 rpm torque pasa de 18.97 Kg-m a 21.19 Kg-m hp con el uso de combustible extra + hidrógeno, con un aumento de 2.22 Kg-m en ese punto. A 5400 rpm el torque aumenta de 13.86 Kg-m a 14.54 Kg-m con el uso de combustible extra + hidrógeno, con un aumento de 0.68 Kg-m en ese punto de la gráfica. Se detalla la variación porcentual de aumento en la siguiente tabla.

Tabla 16

Variación porcentual de torque con gasolina extra + HHO.

rpm	Extra	Extra + HHO	Variación
1878	18,97	21,19	10,48%
5486	13,86	14,54	4,68%

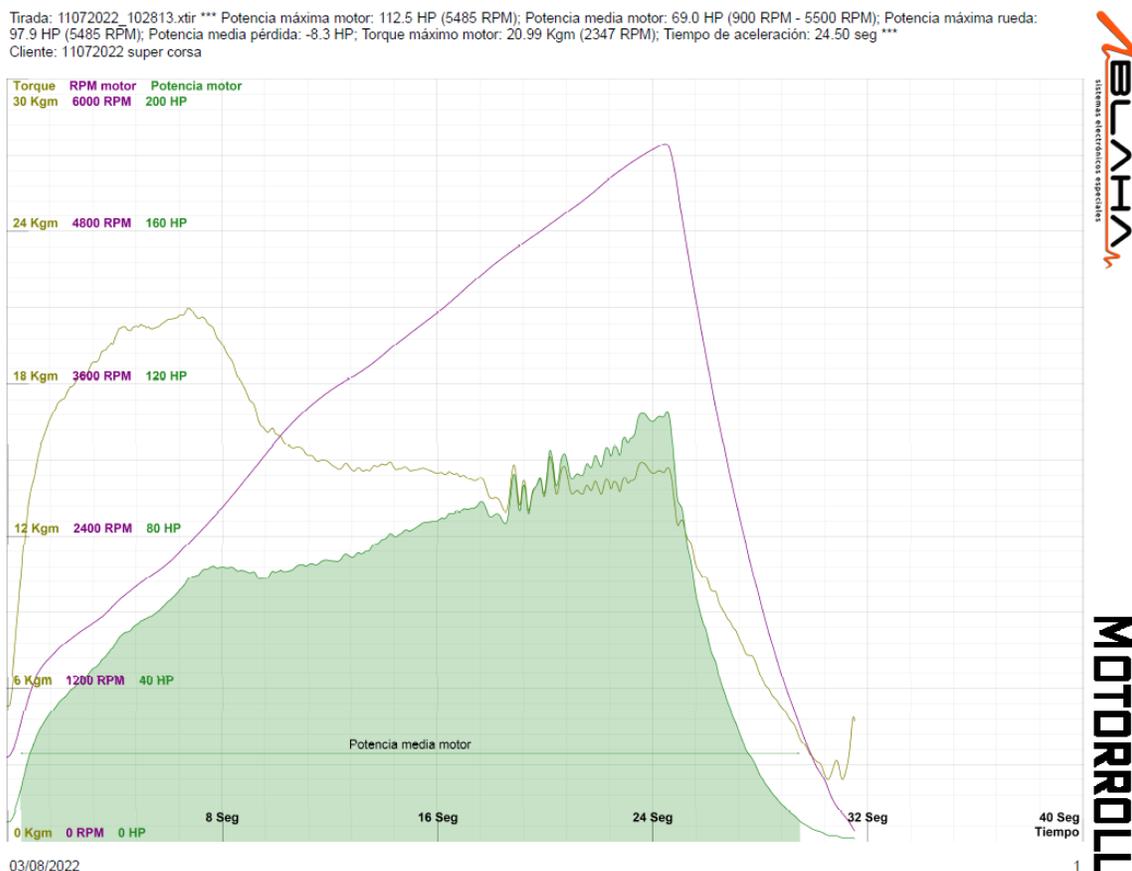
Nota. Valores de torque en Kg-m.

Al utilizar gasolina extra con hidrógeno, el aumento de torque a 5486 rpm es de un 4.68%, en otro punto distinto a 1878 rpm el aumento llega a una variación de 10.48% con respecto al uso del combustible extra. Los valores del torque disminuyen a medida que se aumentan las revoluciones.

Resultados de desempeño con gasolina super.

Figura 36

Gráfica de potencia y torque con gasolina super.



Nota. La figura indica los valores máximos alcanzados de potencia y torque generada por la interfase de MOTORROLL.

La siguiente tabla indica los valores obtenidos con la gasolina super de 92 octanos realizada en el dinamómetro, con una tirada de 24.50 segundos hasta un régimen de giro de 5492 rpm.

Tabla 17*Valores de potencia y torque con gasolina super.*

Tiempo Seg	Torque super Kg-m	RPM motor	Potencia super HP
0,00	5,28	657	4,80
1,26	15,61	1347	29,40
2,52	17,99	1610	40,40
3,78	19,45	1806	49,10
5,05	20,32	2037	57,80
6,31	20,60	2244	64,60
6,78	20,99	2348	68,80
7,57	20,32	2526	71,70
8,83	17,88	2838	70,90
10,09	15,98	3166	70,70
11,35	15,16	3436	72,70
12,61	14,86	3625	75,20
13,87	14,80	3804	78,60
15,13	14,60	4020	82,00
16,39	14,51	4224	85,60
17,65	14,28	4459	88,90
18,91	14,49	4665	94,40
20,18	15,12	4851	102,40
21,44	13,71	5046	96,60
22,70	13,99	5263	102,80
23,96	14,51	5437	110,20

24,50	14,61	5492	112,10
24,56	14,69	5486	112,50
25,22	12,22	4774	81,50
26,48	9,39	3297	43,30
27,74	7,22	2108	21,30
29,00	4,99	1181	8,20
30,26	3,02	531	2,20
30,53	2,38	411	1,40
31,52	4,67	74	0,50

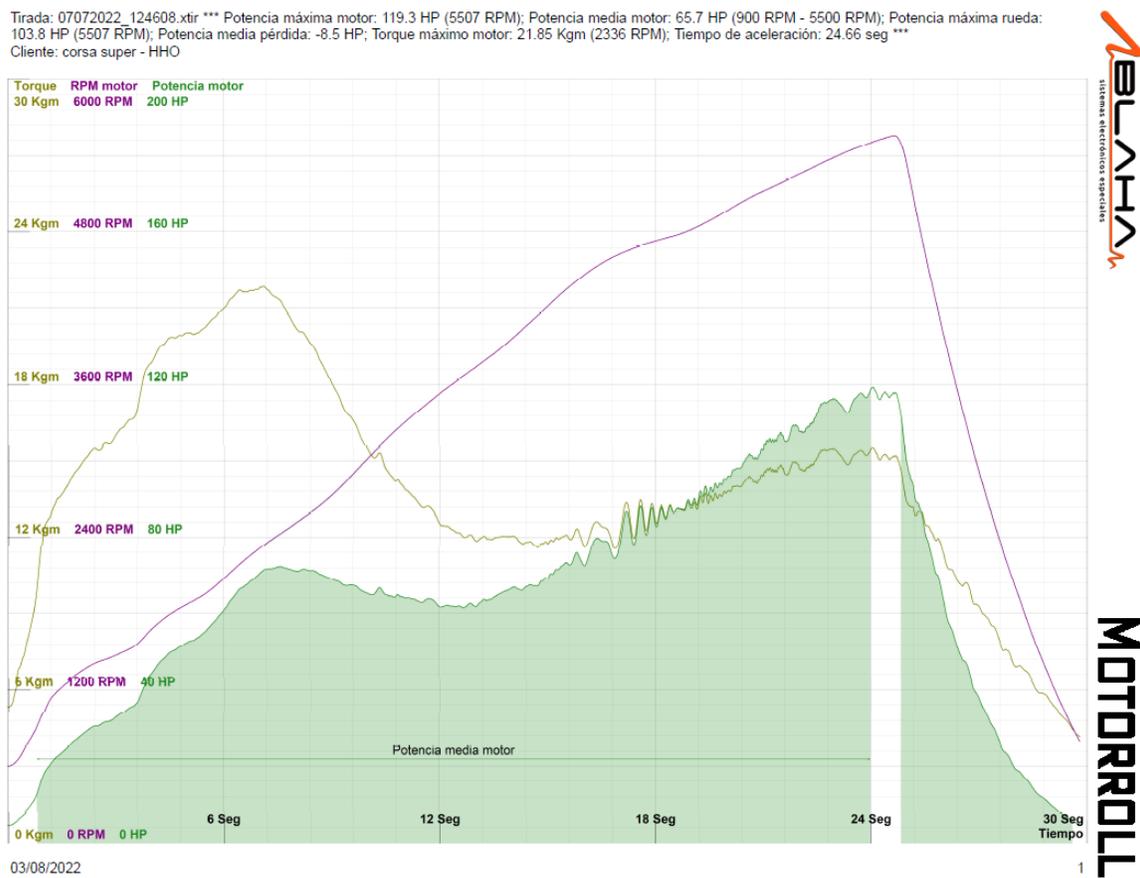
Nota. La tabla indica los valores de potencia y torque máximos a un régimen de rpm.

El máximo torque de 20.32 Kg-m se alcanza a 2526 rpm con una potencia de 71.70 HP durante los primeros 7.57 segundos de la tirada. A 5486 rpm alcanza su potencia máxima que es de 112.50 HP con un torque de 14.69 Kg-m durante 24.56 segundos de la tirada. La potencia se diferencia por 2,50 HP con la establecida por la ficha técnica del motor que es de 110 HP, cumpliéndose así los valores predeterminados para el análisis.

Resultados de desempeño con gasolina super + HHO.

Figura 37

Gráfica de potencia y torque con gasolina super + HHO.



Nota. La figura indica los valores máximos alcanzados de potencia y torque generada por la interfase de MOTORROLL.

La siguiente tabla indica los valores conseguidos de potencia y torque con gasolina super + HHO con una tirada de 24.66 segundos hasta un régimen de giro de 5500 rpm.

Tabla 18

Valores de potencia y torque con gasolina super + HHO.

Tiempo s	Torque Kg-m	RPM motor	Potencia HP
0,00	5,29	599	4,40
1,19	12,92	1132	20,40
2,39	15,50	1397	30,20
3,58	16,83	1549	36,40
4,77	19,93	1834	51,10
5,96	20,93	2057	60,10
7,12	21,85	2337	71,30
7,16	21,83	2344	71,50
8,35	19,79	2579	71,30
9,54	16,74	2881	67,40
10,73	14,25	3223	64,10
11,93	12,74	3510	62,50
13,12	11,93	3756	62,60
14,31	11,72	4033	66,00
15,50	12,07	4340	73,10
16,70	12,22	4583	78,30
17,89	13,27	4716	87,40
19,08	13,36	4825	90,00
20,27	14,01	5011	98,10
21,47	14,77	5180	106,80
22,66	15,42	5342	115,00

Tiempo s	Torque Kg-m	RPM motor	Potencia HP
23,85	15,23	5486	116,70
24,06	15,51	5508	119,30
24,66	15,16	5559	117,70
25,04	13,26	5277	97,70
26,24	10,71	3747	56,10
27,43	8,47	2519	29,80
28,62	5,95	1531	12,70
29,81	4,11	789	4,50

Nota. La tabla indica los valores de potencia y torque máximos a un régimen de rpm.

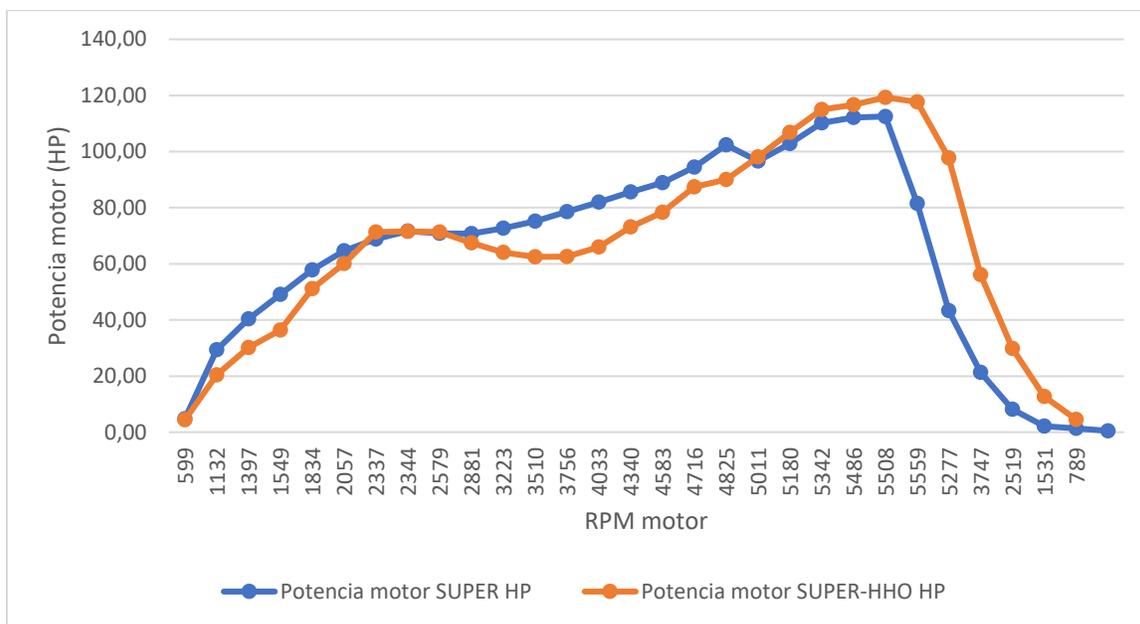
Al utilizar gasolina super, el torque máximo de 21.83 Kg-m se consigue a 2337 rpm durante los primeros 7.12 segundos de la tirada, en donde la potencia alcanzada a ese régimen es de 71.30 HP. La potencia máxima de 119.3 HP se consigue a los 5508 rpm durante los 24.6 segundos, en donde el torque disminuye a 15.23 Kg-m.

Análisis y relación de potencia combustible super vs gasolina super + HHO

La figura 38 presenta la relación de potencia dada entre los valores del combustible super en contra del super + HHO en los diferentes puntos de revoluciones por minuto dadas por el Software del dinamómetro automotriz utilizado en la prueba.

Figura 38

Relación de potencia de combustible super vs super + HHO.



Nota. Las curvas corresponden a la potencia del motor utilizando gasolina super (curva azul) y super + hidrógeno (curva naranja).

Al analizar 3 puntos de la curva con combustible super + hidrógeno, a 1350 rpm la potencia aumenta de 29,4 hp a 30,2 hp, a 2550 rpm la potencia disminuye de 71,7 hp a 71,3 hp y a 5486 rpm aumenta de 112,5 hp a 116,7 hp con respecto a solo el uso combustible super. La variación porcentual se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 19

Variación porcentual de potencia hp con combustible super + HHO.

rpm	Super	Super + HHO	Variación
1350	29,4	30,2	+2,65%
2550	71,7	71,3	-0,56%

rpm	Super	Super + HHO	Variación
5486	112,5	116,7	+3,60%

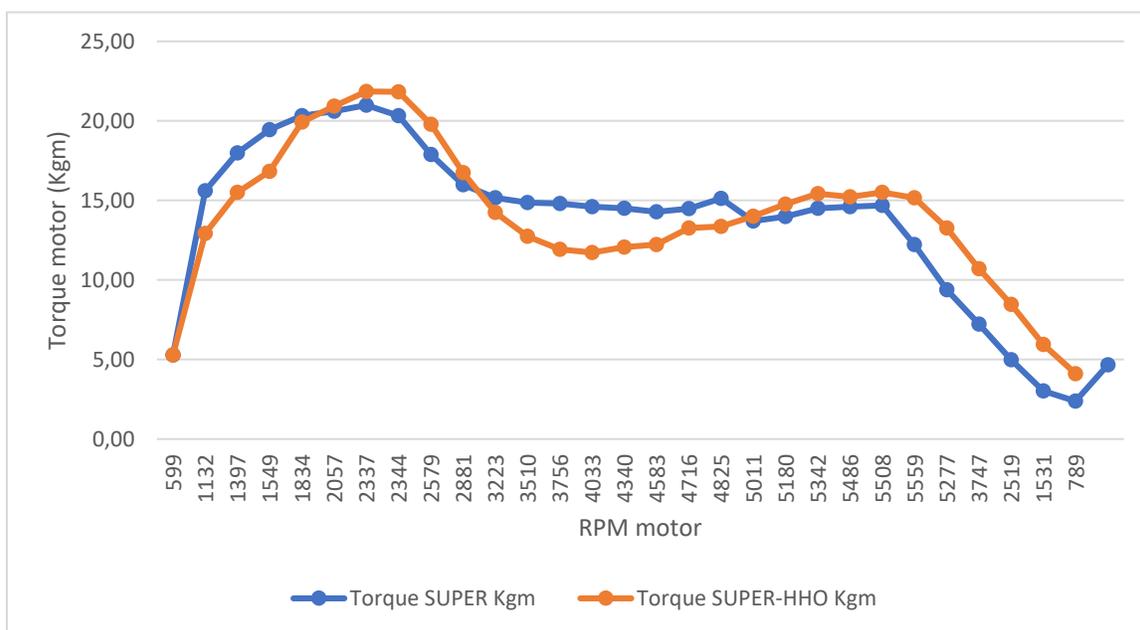
Nota. (+) Incremento, (-) disminución de potencia.

Al usar super + HHO, a 1350 rpm la potencia aumentó en un 2.65 %, a 2550 rpm disminuyó en un 0.56% y a 5486 aumentó en un 3.60% con respecto al uso de solo el combustible super.

Análisis y relación de torque con combustible super vs gasolina super + HHO

Figura 39

Relación de torque con combustible super vs super + HHO



Nota. Las curvas corresponden al torque del motor utilizando gasolina super y super + hidrógeno.

En el análisis de la curva al utilizar hidrógeno con combustible super con respecto a solo el uso de combustible super se consideró 3 puntos de relación, en donde a 1350 rpm el torque disminuyó de 15.61 Kg-m a 15.5 Kg-m, a 2550 rpm disminuyó de 20.32 Kg-m a 19.79 Kg-m y a

5486 rpm aumentó de 14.69 Kg-m a 15.23 Kg-m. La siguiente tabla expresa la variación porcentual de cada uno de los puntos de análisis.

Tabla 20

Variación porcentual de torque Kg-m con combustible super + HHO.

rpm	Super	Super + HHO	Variación
1350	15,61	15,5	0,70%
2550	20,32	19,79	2,61%
5486	14,69	15,23	3,55%

Nota. (+) Incremento, (-) disminución de torque.

Prueba de consumo de combustible

Para obtener los datos de consumo de combustible, se aplicó el protocolo WLTP, cuya trayectoria cumple con 30 kilómetros dando su inicio en el Centro de salud del barrio Patután provincia de Cotopaxi hasta Talleres Villacís Troncal de la Sierra límite con la provincia de Tungurahua, la ruta de ida cumple un tiempo estimado de 42 minutos a velocidad y flujo de tráfico moderado, manteniendo un régimen de revoluciones entre 2500 a 3000 rpm. Para obtener datos con mayor fiabilidad fue necesario implementar un tanque secundario, el cual permite medir la cantidad de combustible consumido en sus distintas condiciones, el cual consta de un recipiente transparente y graduado, que permite medir el volumen de combustible con mayor precisión con una capacidad de 7 litros que al finalizar la ruta en cada prueba se procede a medir la cantidad de combustible restante con una probeta graduada en mililitros.

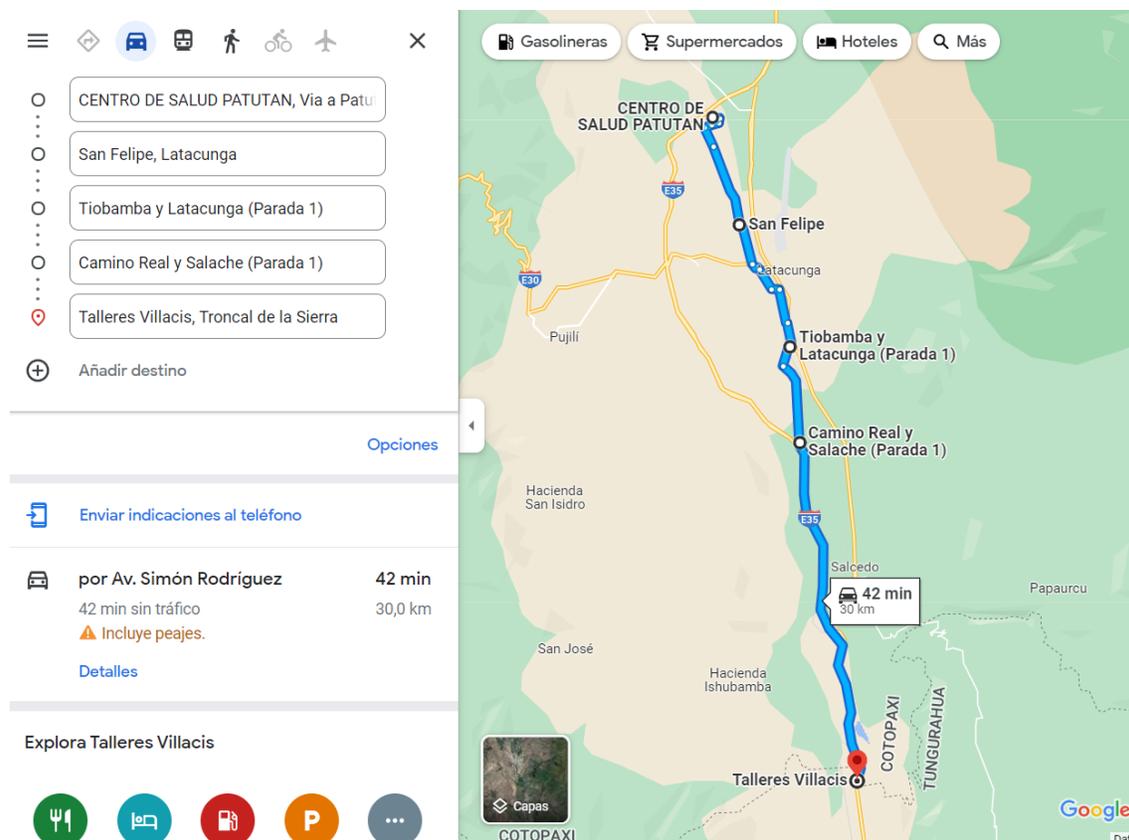
Tabla 21*Protocolo WLTP para consumo de combustible*

Protocolo WLTP (Procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizados en todo el mundo)	
Ciclo de prueba	Ciclo dinámico
Duración de ciclo	Mínimo 30 minutos
Distancia del ciclo	Mínimo 23,25 kilómetros
Fase de conducción	52% urbano – 48% extraurbano
Velocidad media	46,5 kilómetros por hora
Velocidad máxima	131 kilómetros por hora
Cambios de velocidad	Calculados para cada automotor
Temperaturas de prueba	14°C a 23°C

Nota. En la tabla se observa los parámetros básicos del protocolo a cumplir para la prueba de consumo de combustible en ruta. Obtenido de <https://www.dsautomobiles.es/universo-ds/tecnologia/wltp.html>

Figura 40

Ruta para el análisis de consumo de combustible.



Nota. Detalle de trayecto recorrido. Tomada de (Google Maps, 2022).

En la figura 40 se observa que el trayecto del Centro de salud Patután hasta Camino Real y Salache (Parada 1) cubre el 52% de trayecto urbano con 15,6 kilómetros, seguido la ruta hasta Talleres Villacís-Troncal de la Sierra cubre el 48% de trayecto extraurbano con 14,4 kilómetros.

Resultados y análisis con combustible extra vs extra + HHO

Tabla 22

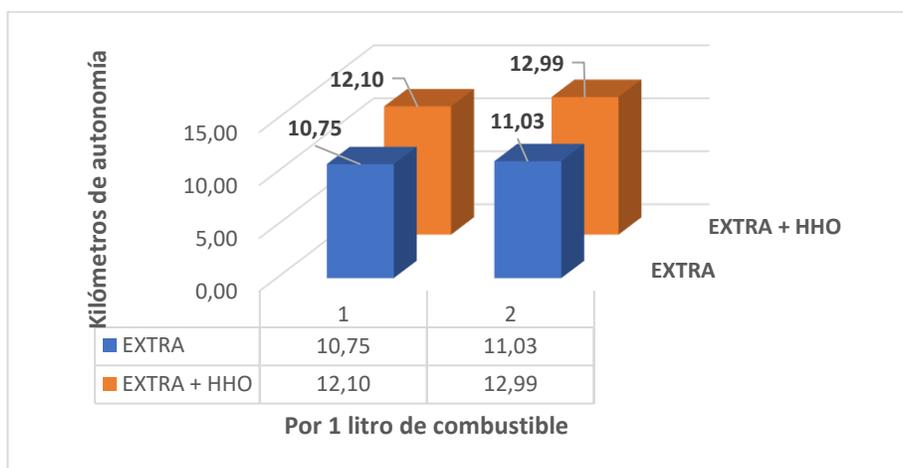
Datos de prueba de ruta con combustible extra vs extra + HHO.

Sistema	Número de pruebas	Cantidad consumida (l)	Distancia ruta (Km)	Velocidad media km/h	Tiempo empleado min	Autonomía Km/l	Valor promedio	Variación autonomía (%)
Extra	1	2,79	30	46,32	45	10,75	10,89	15,16
	2	2,72	30	44,26	48	11,03		
+ HHO	1	2,48	30	45,25	46	12,10	12,54	
	2	2,31	30	47,29	43	12,99		

Nota. En la tabla se observa el nivel de consumo efectuado en condición solo EXTRA y combinado EXTRA – HHO, dos pruebas cada condición.

Figura 41

Análisis de consumo de combustible extra vs extra + HHO.



Nota. Comparación de la autonomía del combustible extra representado por el color azul, frente a la combinación del extra y HHO representado por el color naranja.

Una vez realizado las dos pruebas por cada condición en el consumo de combustible extra vs extra + HHO, se obtuvo un valor promedio de 10.89 kilómetros por litro de combustible en condición solo con combustible extra y un 12.54 kilómetros por litro de combustible en condición dual extra + HHO, consiguiendo así un ahorro de un 15.16 % en autonomía, estos valores se ven reflejados en la tabla.

Resultados y análisis con combustible super vs super + HHO

Tabla 23

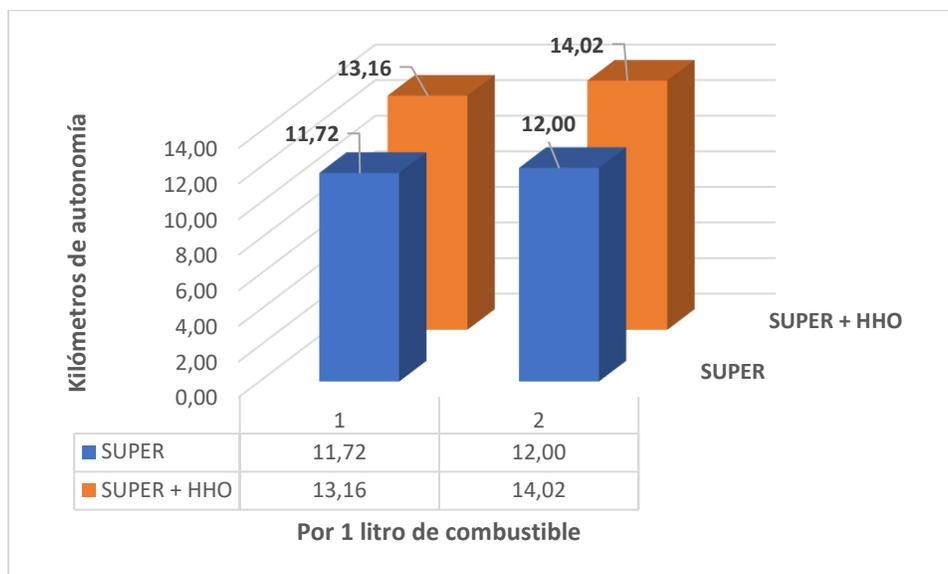
Datos de prueba de ruta de combustible super vs super + HHO.

Sistema	Número de pruebas	Cantidad consumida (l)	Distancia ruta (Km)	Velocidad media km/h	Tiempo empleado min	Autonomía Km/l	Valor promedio	Variación autonomía
Super	1	2,56	30	47,12	47	11,72	11,86	14,58
	2	2,50	30	47,98	44	12,00		
Super + HHO	1	2,28	30	44,52	48	13,16	13,59	
	2	2,14	30	45,29	46	14,02		

Nota. En la tabla se observa el nivel de consumo efectuado en condición solo super y su combinado super + HHO, dos pruebas cada condición.

Figura 42

Análisis de consumo de combustible super vs super + HHO



Nota. En la figura se observa la comparación de la autonomía del combustible super (azul) frente a la combinación del super + HHO (naranja).

Una vez realizado las dos pruebas por cada condición en el consumo de combustible super vs super + HHO, se obtuvo un valor promedio de 11.86 kilómetros por litro de combustible en condición super, y un 13.59 kilómetros por litro de combustible en condición dual super + HHO, obteniendo así un ahorro de un 14.58% en autonomía, estos valores se ven reflejados en la tabla 20.

Pruebas de emisiones del motor con el analizador de gases

Las pruebas de emisiones de gases contaminantes del motor de combustión interna OPEL de 1.8 L se realizaron en el laboratorio de Autotrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas con el analizador de gases CARTEK, aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a una altura de 2820 m sobre el nivel del mar en la parroquia Belisario Quevedo del cantón Latacunga.

Figura 43

Prueba de emisiones contaminantes en el vehículo Opel Corsa 1.8L



Nota. Las pruebas de emisiones se realizaron en Belisario Quevedo con el Analizador de Gases de la marca CARTEK.

Prueba de emisiones con combustible extra

Los datos de la prueba de emisiones contaminantes que se realizaron en modo ralentí y crucero al utilizar la gasolina extra de 87 octanos en el motor de combustión interna OPEL de 1.8 L se detallan en la figura 31.

Tabla 24

Prueba de emisiones de gases con gasolina extra.

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
HC	172	61	165	54	161	48	166	54,33
CO (%V)	0,55	0,71	0,58	0,72	0,68	0,76	0,60	0,73

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
CO2 (%V)	13,27	13,34	13,28	13,32	13,22	13,35	13,26	13,34
O2 (%V)	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,04	0,04	0,03
RPM	774	2229	776	2141	765	2229	772	2200

Nota. En la figura se observa los resultados de gases HC, CO, CO₂ y O₂ emitidos por el vehículo al utilizar gasolina extra.

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios en ralentí a 772 rpm y en crucero a 2200 rpm, en donde los HC llegaron a 166 ppm en ralentí y 54.33 ppm en crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.60 y en modo crucero 0.73, del dióxido de carbono CO₂ de 13,26 en ralentí y 13.34 en crucero, del oxígeno O₂ de 0.04 en ralentí y 0.03 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Prueba de emisiones con combustible extra y HHO

En la siguiente figura se muestra los resultados de emisiones de gases contaminantes del vehículo con gasolina Extra y HHO.

Tabla 25

Prueba de emisiones de gases con gasolina extra y HHO (NTE INEN 2204)

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
HC	178	58	173	59	173	58	174,67	58,33
CO (%V)	0,56	0,74	0,52	0,75	0,5	0,72	0,53	0,74

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
CO2 (%V)	13,29	13,32	13,35	13,3	13,28	13,32	13,31	13,31
O2 (%V)	0,05	0,01	0,05	0,02	0,04	0,04	0,05	0,02
RPM	773	2151	764	2090	772	2083	769	2108

Nota. En la tabla se observa los resultados de gases HC, CO, CO2 y O2 emitidos por el vehículo al utilizar gasolina extra y HHO.

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 para la medición de gases contaminantes del motor a una altura a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios en ralentí a 769 rpm y en crucero a 2108 rpm, en donde los hidrocarburos no combustionados HC llegaron a 174.67 ppm en ralentí y 58.33 ppm en modo crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.53 y en modo crucero 0.74, del dióxido de carbono CO2 de 13,31 en ralentí y crucero, del oxígeno O2 de 0.05 en ralentí y 0.02 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Relación y análisis de emisiones con combustible extra vs extra + HHO.

Al implementar hidrógeno con combustible extra en el motor, se realizó un resumen de los datos conseguidos en modo crucero y ralentí con la variación porcentual con respecto al otro, en donde según la norma NTE INEN 2204 los límites de HC, CO, CO2 y O2 aprobaron la prueba en ambos casos.

Tabla 26

Variación de emisiones contaminantes con combustible extra vs extra + HHO.

Parámetros	Ralentí			Crucero			Limite
	Extra	Extra + HHO	Variación	Extra	Extra + HHO	Variación	
HC (ppm)	166	174,67	+4,96%	54,33	58,33	+6,86%	200 ppm
CO (%V)	0,60	0,53	-11,67%	0,73	0,74	-0,90%	1%
CO2 (%V)	13,26	13,31	+0,38%	13,34	13,31	-0,17%	7%
O2 (%V)	0,04	0,05	+20,00%	0,05	0,02	60%	5%

Nota. La tabla indica las variaciones en modo ralentí y crucero de la prueba estática de emisiones contaminantes con la norma INEN NTE 2204 al utilizar combustible extra + HHO.

Los hidrocarburos no combustionados HC aumentan en 4.96% al usar combustible extra + HHO en ralentí y en modo crucero en un 6.86%. Sin embargo, con el monóxido de carbono sucede lo contrario, pues se reduce en un 11.67% en ralentí y en un 0.90 % en modo crucero. Los porcentajes de dióxido de carbono en volumen varían en un aumento del 0.38% en ralentí y una disminución del 0.17% en modo crucero. Y el oxígeno tuvo un aumento de 0,01 puntos en ralentí y una disminución de 0.03 puntos de en modo crucero.

Pruebas de emisiones con combustible super.

En la siguiente tabla se muestra los resultados de emisiones de gases contaminantes del vehículo con gasolina super.

Tabla 27

Prueba de emisiones de gases con gasolina super.

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
HC	178	54	159	52	168	51	168,33	52,33
CO (%V)	0,69	0,77	0,61	0,77	0,6	0,75	0,63	0,76
CO2 (%V)	13,27	13,42	13,37	13,46	13,28	13,46	13,31	13,45
O2 (%V)	0,06	0,03	0,06	0,03	0,05	0,02	0,06	0,03
RPM	774	2229	774	2220	765	2207	771,00	2219

Nota. En la tabla se observa los resultados de gases HC, CO, CO2 y O2 emitidos por el motor al utilizar gasolina super.

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios al utilizar el combustible super, en ralentí a 771 rpm y en modo crucero a 2219 rpm, en donde los HC llegaron a 168.33 ppm en ralentí y 52.33 ppm en modo crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.63 y en modo crucero 0.76, del dióxido de carbono CO2 de 13,31 en ralentí y 13.45 en crucero, del oxígeno O2 de 0.06 en ralentí y 0.03 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Pruebas de emisiones con combustible super y HHO

En la siguiente tabla se muestra los resultados de emisiones de gases contaminantes del vehículo con gasolina super y HHO aplicando la norma NTE INEN 2204.

Tabla 28

Resultados de la prueba de emisiones de gases con gasolina super y HHO

Parámetros	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Promedio	
	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero	Ralentí	Crucero
HC	173	52	176	54	171	53	173,33	53,00
CO (%V)	0,5	0,78	0,61	0,76	0,55	0,76	0,55	0,77
CO2 (%V)	13,36	13,46	13,35	13,6	13,41	13,44	13,37	13,50
O2 (%V)	0,07	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,06	0,03
RPM	771	2220	772	2213	771	2214	771	2216

Nota. En la tabla se observa los resultados de gases HC, CO, CO2 y O2 emitidos por el vehículo al utilizar gasolina super y HHO.

Aplicando la norma técnica NTE INEN 2204 a 2820 m sobre el nivel del mar se realizaron tres mediciones con sus respectivos promedios, en ralentí a 771 rpm y en crucero a 2216 rpm, en donde los HC llegaron a 173.33 ppm en ralentí y 53 ppm en crucero. El porcentaje en volumen del monóxido de carbono CO en modo ralentí llegó a 0.55 y en modo crucero 0.77, del dióxido de carbono CO2 de 13,37 en ralentí y 13.50 en crucero, del oxígeno O2 de 0.06 en ralentí y 0.03 en crucero. Los datos conseguidos aprobaron la norma técnica NTE INEN 2204.

Relación y análisis de emisiones con combustible super vs super + HHO.

Al aplicar la norma NTE INEN 2204 para el estudio de las emisiones contaminantes, se realizó una tabla resumen con variaciones porcentuales con cada uno de los parámetros de HC, CO, CO2 y O2 al utilizar gasolina super con hidrógeno.

Tabla 29

Variación de emisiones contaminantes con combustible super vs super + HHO

Parámetros	Ralentí			Crucero			Limite
	Super	Super + HHO	Variación	Super	Super + HHO	Variación	
HC (ppm)	168,33	173,33	+2,88%	52,33	53,00	+1,26%	200 ppm
CO (%V)	0,63	0,55	-12,70%	0,76	0,77	+1,30%	1%
CO2 (%V)	13,31	13,37	+0,45%	13,45	13,50	- 0,37%	7%
O2 (%V)	0,06	0,06	0,00%	0,03	0,03	0,00%	5%

Nota. La tabla indica las variaciones en modo ralentí y crucero de la prueba estática de emisiones contaminantes con la norma INEN NTE 2204 al utilizar combustible super + HHO.

Al implementar hidrógeno con gasolina super, los hidrocarburos no combustionados HC en el estudio, aumentaron en un valor porcentual de 2.88% en modo ralentí y en modo crucero en un 1.26%. En cambio, hubo una reducción del monóxido de carbono CO de un 12.70% en ralentí y en modo crucero aumentó en un 1.3 %. Y con el dióxido de carbono CO2 en modo ralentí aumentó en un 0.45% y disminuyó en modo crucero en un 0.37%. Los valores porcentuales de oxígeno no tuvieron variación en ambos casos y ambos aprobaron la norma NTE INEN 2204.

Matematización de los parámetros térmicos y mecánicos del motor de combustión interna con gasolina Extra, Súper y su combinación de HHO

Al iniciar el cálculo de los parámetros térmicos del motor, se toma en cuenta que el vehículo se encuentra en la ciudad de Latacunga a una altura de 2850 msnm, es decir que la presión atmosférica es de 72346.5 Pa.

Cálculo de la presión al final de la admisión (Pa).

El coeficiente de amortiguación y resistencia $\beta^2 + \xi = 3.1$ para vehículos a gasolina y la velocidad del aire a ese régimen de $W_{ad} = 82 \text{ m/s}$ a una temperatura de 12°C .

Densidad del aire al final de la admisión

$$\rho_o = \frac{P_o}{R * T_o} = \frac{72346.05 \text{ Pa}}{286.9 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} \cdot \text{K} * 285.15^\circ\text{K}} = 0.88 \text{ kg/m}^3$$

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi) * \frac{W_{ad}^2}{2} * \rho_o$$

$$P_a = 72346.05 \text{ Pa} - (3.1) * \frac{(82 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} * 0.88 \text{ kg/m}^3$$

$$P_a = 63174.51 \text{ Pa} = 0.0631 \text{ MPa}$$

Cálculo de la temperatura al final de la admisión (T_a)

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + Y_r * T_r}{1 + Y_r}$$

$$T_a = \frac{285.15^\circ\text{K} + 20^\circ\text{K} + 0.087 * 969.6^\circ\text{K}}{1 + 0.087}$$

$$T_a = 358.33^\circ\text{K} = 85.33^\circ\text{C}$$

Cálculo de presión al final de la compresión (P_c)

$$P_c = P_a * \varepsilon^k$$

$$P_c = 63174.51 \text{ Pa} * 9.5^{1.34}$$

$$P_c = 1290302.42 \text{ Pa} = 1.29 \text{ MPa}$$

Cálculo de temperatura al final de la compresión (T_c)

$$T_c = T_a \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{k-1} = T_a \varepsilon^{k-1}$$

$$T_c = 358.33 \text{ K} * 9.5^{1.34-1}$$

$$T_c = 570$$

Cálculo de la temperatura de combustión (T_z)

La temperatura debe de ser de:

$$2500 \text{ }^\circ\text{K} \leq T_z \leq 2700 \text{ }^\circ\text{K}$$

Cálculo de la presión de combustión (P_z)

$$P_z = \mu_r * \frac{T_z}{T_c} * P_c$$

$$P_z = 1.075 * \frac{2550 \text{ }^\circ\text{K}}{570 \text{ K}} * 1.29 \text{ MPa}$$

$$P_z = 4.59 \text{ MPa}$$

Cálculo al final de la expansión (P_b)

$$P_b = \frac{P_z}{\varepsilon^{n2}}$$

$$P_b = \frac{4.59 \text{ Pa}}{9.5^{1.3}}$$

$$P_b = 0.24 \text{ MPa}$$

Cálculo de la temperatura al final de la expansión (T_b)

$$T_b = T_z \left(\frac{1}{\varepsilon^{n2-1}} \right)$$

$$T_b = \frac{2550 \text{ K}}{9.5^{1.3-1}}$$

$$T_b = 1297,84 \text{ K}$$

Cálculo del calor suministrado al sistema

$$q_1 = c_v(T_z - T_c)$$

$$q_1 = 0.718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{K}} * (2550\text{K} - 570.38 \text{ K})$$

$$q_1 = 1979.62 \text{ KJ/Kg}$$

Cálculo del calor extraído del sistema

$$q_2 = c_v(T_b - T_a)$$

$$q_2 = 0.718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{K}} * (1297,84 \text{ K} - 358.33 \text{ K})$$

$$q_2 = 574.56 \text{ KJ/Kg}$$

Cálculo del trabajo del ciclo

$$q_c = q_1 - q_2$$

$$q_c = 1979.62 \text{ KJ/Kg} - 574.56 \text{ KJ/Kg}$$

$$q_c = 1305 \text{ KJ/Kg}$$

Cálculo de la eficiencia térmica

$$n_t = 1 - \frac{574.56 \text{ KJ/Kg}}{1979.62 \text{ KJ/Kg}}$$

$$n_t = 0.29$$

Capítulo V

Marco administrativo

Recursos

El desarrollo del proyecto se ve sustentado por tres recursos importantes, humanos, tecnológicos y materiales, mismos que son necesarios establecer y administrar, para evitar inconvenientes en la ejecución del proyecto.

Recursos Humanos

El inicio de un proyecto parte desde el recurso más importante en su ejecución que es humano con sus autores y colaborador, detallados en la siguiente tabla.

Tabla 30

Recursos humanos

Nombre	Cargo
Sr. Aimacaña Caisaluisa Darwin Paúl	Investigador
Sr. Masapanta Alomoto Marco Eduardo	Investigador
Ing. Washington German Erazo Laverde	Director del trabajo de titulación

Nota. La tabla detalla los participantes en el proyecto y al supervisor de la investigación.

Recursos Tecnológicos

Para el desarrollo del proyecto, se utilizó varios recursos tecnológicos, entre ellos se tiene: la computadora como base de almacenamiento y administrador de programas necesarios para equipos de análisis y cálculos, un celular para capturar evidencias, como fotografías, videos y grabado de ruta a través de la aplicación WIKILOC, los cuales se detallan de mejor manera en la tabla

Tabla 31*Recurso tecnológicos*

Ord.	Detalle
1	Software de diseño en 2D y 3D
2	Office
3	Laptop
4	Internet
5	Celular
6	Aplicación Wikiloc y GPS
7	Motorroll Power Test e Inspector Cartek

Nota. La tabla indica los recursos tecnológicos utilizados en el proyecto.

Recursos materiales

Para la implementación del generador de celda seca en el motor de combustión interna Opel Corsa de 1.8 L se emplearon los siguientes elementos detallados en la tabla 22.

Tabla 32*Recursos materiales*

Ord.	Detalle
1	Automóvil Chevrolet Corsa 1800 cc
2	Dinamómetro de inercia MOTORROLL
3	Analizador de gases CARTEK
4	Bomba de combustible secundario
5	Reactor de hidrógeno
6	Depósito de electrolito

Ord.	Detalle
7	Filtros para HHO
8	Acoples metálicos 8 mm
9	Mangueras 8 mm
10	Bases metálicas
11	Tuercas
12	Pernos
13	Cable flexible 12
14	Terminales
15	Relevador 12V
16	Portafusibles expansor
17	Interruptor dos posiciones
18	Recubrimiento aislante
19	Hidróxido de potasio
20	Agua común
21	Concentrado de refrigerante
22	Bicarbonato de sodio

Nota. Recursos empleados en la implementación del proyecto.

Presupuesto

En el presente apartado se detalla el valor del presupuesto invertido en la investigación y aplicación del proyecto.

Ord	Detalle	Cantidad	V. Un.	Total
1	Puesta a punto Chevrolet Corsa 1800 cc	1	200	200

Ord	Detalle	Cantidad	V. Un.	Total
2	Pruebas dinamómetro de inercia MOTORROLL	4	12.5	50
3	Analizador de gases CARTEK	4	10	40
4	Bomba de combustible secundario	1	50	50
5	Reactor de hidrógeno	1	350	350
6	Depósito de electrolito	1	10	10
7	Filtros para HHO	3	5	15
8	Acoples metálicos 8 mm	4	3.5	14
9	Mangueras 8 mm	6	1.25	7.5
10	Bases metálicas	6	1.5	9
11	Tuercas	10	0.75	7.5
12	Pernos	10	0.3	3
13	Cable flexible 12	7	1.15	8.05
14	Terminales	8	0.25	2
15	Relevador 12V	1	5	5
16	Portafusibles expansor	1	3	3
17	Interruptor dos posiciones	1	2.5	2.5
18	Recubrimiento aislante	1	1.5	1.5
19	Hidróxido de potasio	1	2	2
20	Agua común	4	0.5	2
21	Concentrado de refrigerante	1	2	2
22	Bicarbonato de sodio	1	2	2
Total				786.05

Nota. Presupuesto empleado en la culminación del presente proyecto.

Financiamiento

El costo total del proyecto fue cubierto en su totalidad por los investigadores, Sr Aimacaña Caisaluisa Darwin Paúl y Sr. Masapanta Alomoto Marco Eduardo.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se implementó de manera exitosa el sistema de generación de hidrógeno de celda seca en el MCI 1.8 L Opel.
- Las pruebas de desempeño, consumo y emisiones se realizaron con combustible extra y super, cuyos valores de octanaje son 87 y 92 octanos respectivamente y su combinación con HHO.
- La mezcla del electrolito está preparada por componentes de fácil acceso en el mercado, como es hidróxido de potasio, bicarbonato, concentrado de refrigerante y agua común.
- El reactor de HHO consume un amperaje de 4,55 amperios a 13,91 voltios en corriente continua, valor equivalente a 6 bombillos del auto.
- Al añadir combustible extra y HHO al sistema de admisión del motor se obtuvo un incremento en la potencia motor de 6,6 hp a un régimen aproximado de 5400 rpm, representando así una variación del 6%, por otra parte, al inyectar combustible super y HHO al sistema se obtuvo un incremento en la potencia motor de 4,2 hp a un régimen aproximado de 5486 rpm, representando así una variación del 3%.
- Al añadir combustible extra y HHO al sistema de admisión del motor se obtuvo un incremento en el torque de 0,68 kg-m a un régimen aproximado de 5486 rpm, representando así una variación del 4,68%, por otra parte, al inyectar combustible super y HHO al sistema se obtuvo un incremento en el torque de 0,54 kg-m a un régimen aproximado de 5486 rpm, representando así una variación del 3,55%.

- Se obtuvo un ahorro de combustible de un 15,16% con combustible extra y HHO, y un 14,58% con combustible super y HHO, estos valores fueron obtenidos aplicando el protocolo WLTP para pruebas de consumo de combustible.
- Referente a las emisiones contaminantes al ingresar combustible extra y HHO al sistema se redujo en un 11.67% el monóxido de carbono a ralentí, y una disminución del dióxido de carbono de un 0.17% en régimen crucero, y al ingresar combustible super y HHO se redujo un 12.70% el monóxido de carbono a ralentí, y una disminución del dióxido de carbono de un 0.37% en régimen crucero, mismos valores aprueban la norma NTE INEN 2204.
- La instalación y análisis del sistema del generador de hidrógeno tipo celda seca tuvo un costo total de 786,05 dólares americanos.

Recomendaciones

- Para el estudio de la influencia del HHO sobre los parámetros característicos del motor, requiere de la puesta a punto y óptimo funcionamiento del mismo, para obtener datos fiables para el análisis.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico del generador de hidrógeno voltaje, amperaje y resistencias, para evitar una ineficiencia en el reactor o un consumo inadecuado del voltaje de la batería que presentaría problemas para el correcto funcionamiento del vehículo.
- Para la conexión de ductos y acoples que transportan el hidrógeno, se debe comprobar posibles fugas de este, para esto se recomienda el uso de una solución jabonosa que permitirá visualizar una inadecuada conexión.
- Es recomendable para las pruebas y análisis de parámetros característicos del motor, basar en la ficha técnica, normas y protocolos vigentes, como es WLTP para las pruebas de consumo y la norma NTE INEN 2204 para análisis de gases contaminantes.
- Al realizar la prueba de consumo de combustible es necesario un prototipo del sistema de almacenamiento y bombe del mismo, que permita medir con mayor precisión su volumen.
- Previo a realizar las pruebas de este estudio es muy importante tomar medidas de protección, como el uso de mascarilla, gafas de protección, guantes, mandil, extintor, números telefónicos de emergencia entre otros, debido a la manipulación de sustancias altamente inflamables.

Bibliografía

Asensio, P. (2007). Hidrógeno y pila de combustible. *Energías Renovables para todos*.

Auto desguace Matías. (15 de febrero de 2021). *El filtro de combustión de un coche: Qué es y qué función tiene*. Auto Sesguaces Matías: <https://autodesguacematias.com/el-filtro-de-combustible-de-un-coche-que-es-y-que-funcion-tiene/>

Banco Mundial. (2022). *Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)*.

<https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?end=2019&start=1990&view=chart>

Barreto, W., & Jiménez, J. (2013). *Análisis del tren alternativo del motor que funciona a hidrógeno versus el motor a gasolina (Tesis Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas)*. Repositorio Institucional, Latacunga.

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7016>

Castillo, J., Rojas, V., & Martínez, J. (2017). Determinación del Torque y Potencia de un Motor de Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Sensor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático. *Revista Politécnica*, 39(1), 40-58.
https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/719

De Antonio, A. R., & Muñoz, M. (2015). *Motores de Combustión interna*.

www.uned.es/Publicaciones. <https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/48846>

De Correa, C., & Hernández, G. (1998). Combustibles Alternativos. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 67-77.

Díaz , Á., González , J., & González, A. (2018). Análisi de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154.

<https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018013>

- Díaz, D. (2009). *Hidrógeno: Combustible al alcance de todos*. Bogotá.
- Duque, E., & Masaquiza, J. (2013). *Implementación de un generador de inyector de hidrógeno en un motor de vehículo Mazda BT-50 2.2 L, para reducir emisiones de gases contaminantes*(Tesis Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Repositorio Institucional, Riobamba, Ecuador.
- El Comercio. (1 de noviembre de 2019). Parque automotor de Ecuador creció en 1,4 millones de vehículos en una década. págs. 1-12. <https://bit.ly/3le6vsj>
- El Telégrafo. (2 de agosto de 2018). El transporte motorizado es el que más contamina. págs. 2-14. <https://bit.ly/3wdRW5H>
- Fabitrncoso. (22 de Marzo de 2014). *Producción de hidrógeno por electrólisis del agua*. WordPress: <https://bit.ly/3KLSCmP>
- Fábrega, M. (2009). *Hidrógeno Aplicación en motores de combustión interna*. Barcelona.
- Fernández, P. (6 de Mayo de 2019). *Desmontando mitos sobre el coche de hidrógeno*. ABC Motor: <https://bit.ly/3CQTNhV>
- Google Maps. (12 de Julio de 2022). *Centro de Salud Patutan - Laguna del Yambo* . Google: <https://goo.gl/maps/9wLfZL1wW48fGtKZ9>
- Gutiérrez, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 99(1), 49 - 67.
- Iniestra, R., Franco, P., Allen, J., Tejada, D., & Aguilar, J. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*. (R. De Pont, Ed.) <https://bit.ly/36hJ048>

- Juma, D., & Martínez, H. (2015). *Diseño e instalación de un sistema de alimentación gasolina - HHO en el motor de combustión interna del vehículo monoplaça tipo Buggy del laboratorio de mecánica de patio de la Espe extensión Latacunga (Tesis de Pregrado, ESPE)*. Repositorio Institucional, Latacunga.
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10023>
- Martínez, O., & Nilve, A. (2014). *Montaje, análisis y monitoreo de un sistema generador de hidrógeno como economizador de combustible en un vehículo Nissan Coupé 1200*. ESPOCH Facultad de Mecánica.
- Mena, L. A. (2018). *Matemática aplicada a los Sistemas de los motores de combustión interna*. (D. Andrade, Ed.) <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20336>
- NTE INEN 2204. (2017). *INEN 2204 GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES QUE EMPLEAN GASOLINA*. Quito, Ecuador.
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2204-2.pdf
- Pérez, A. (2003). Relés electromagnéticos y electrónicos. Parte I: Relés y Contactores. *Revista de Comunicación Vivat Academia*, VI(50), 1-24.
<https://doi.org/dx.doi.org/10.15178/va.2003.50.1-24>
- Poalacín, G., & Vilaña, B. (2021). *Reingeniería y mantenimiento del sistema de control mecánico y electrónico del dinamómetro de rodillos Motorroll (Md200hp), para el desarrollo de pruebas dinámicas en vehículos (Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas)*. Repositorio Institucional.
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/24389/1/T-ESPEL-MAI-0707.pdf>
- Pratt, S., Ayala, K., Medina, E., & Abreu, G. (2003). *Disminución de la concentración de CO de coches Tsuru de los años 1998 al 2003*. Colegio Marymount. <https://bit.ly/3q3NA88>

- Reyes, G., Iñiguez, J., Pupiales, W., Soria, C., & Yépez, J. (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*, 5(1), 19 - 28.
- Rivera, N., Juan, C., Zambrano, I., & García, C. (Octubre de 2017). Estudio Del Comportamiento De Un Motor Ciclo Otto De Inyección Electrónica Respecto De La Estequiometría De La Mezcla Y Del Adelanto Al Encendido Para La Ciudad De Cuenca. *Revista Politécnica*, 40(1). <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v40n1/2477-8990-rpolit-40-01-00059.pdf>
- Secundino, E. (2011). *Motores*. Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/lc/espe/titulos/101844>
- Tamayo, E., Rosales, C., Guzmán, A., & Pazmiño, P. (2016). Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna. *Enfoque UTE*, 7(4), 43 - 54. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>
- Technology, B. F. (21 de enero de 2022). *Información sobre generadores de hidrógeno HHO para vehículos, diseño de célula HHO*. Better Fuel Technology: <https://bit.ly/3JcCyKe>
- Velástegui, S., & Jesús, C. (2015). *Análisis de los parámetros característicos de un motor de combustión interna con inyección directa de hidrógeno (Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas)*. Repositorio Institucional, Latacunga. <https://bit.ly/3w50ICQ>

Anexos