

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA,
INFORMATICA Y MECANICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA



**EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA EMISION DE LOS PRODUCTOS DE
LA COMBUSTION DE UN MOTOR GASOLINERO TOYOTA 1S DE 1.8L
UTILIZANDO GAS NATURAL E HIDROGENO BAJO LAS CONDICIONES
AMBIENTALES DE LA CIUDAD DEL CUSCO**

PRESENTADO POR:

USCAMAYTA LINES, Jonathan
Bachiller en Ingeniería Mecánica

CORTEZ FARFAN, Hernan
Bachiller en Ingeniería Mecánica

ASESOR: **Ing. ARTURO MACEDO SILVA**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico

CUSCO – PERU

2019

PRESENTACION

Señor.

Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y
Mecánica.

En cumplimiento con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos Vigentes regidas en nuestra casa de estudios, para optar al título de Ingeniero Mecánico, damos a conocer el trabajo de investigación intitulado:

“EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA EMISION DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DE UN MOTOR GASOLINERO TOYOTA 1S DE 1.8L UTILIZANDO GAS NATURAL E HIDROGENO BAJO LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE LA CIUDAD DEL CUSCO”

Bach. Hernan Cortez Farfan.

Bach. Jonathan Uscamayta Lines.

DEDICATORIA

A mi familia por ser parte de mi vida quienes con su esfuerzo, respeto, amor y cariño me dieron el impulso y la oportunidad de ser una persona de bien. A mi padre Faustino Uscamayta Rodriguez y a mi madre Alejandrina Lines Sanchez, por el apoyo incondicional en los momentos buenos y malos de esta etapa de mi vida.

A mis hermanos por el apoyo moral, por las prácticas que me sirvieron para seguir adelante y conseguir mis objetivos.

A mis amigos que me ayudaron a crecer como persona y profesional.

Jonathan Uscamayta Lines

A Dios por darme la oportunidad de vivir y aprender cada día más.

A mi madre Leonor Farfan Tocre, a mi padre Victoriano Cortez Leon, a mi hermanita Nadesda Cortez Farfan y a mi tía Ubaldina Farfan Tocre por darme siempre fuerzas ante un momento difícil y compartir alegrías en buenos tiempos en mi vida.

A mis amigos, que siempre me mostraron su apoyo de manera incondicional en todo momento.

Hernan Cortez Farfan

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por brindarnos la oportunidad de tener un objetivo logrado, a nuestros padres, hermanos y amigos que nos brindaron su apoyo incondicional.

Especial agradecimiento a Kevin Oporto Altamirano por ser parte del proyecto y por brindarnos su amistad.

Nuestro sincero y profundo agradecimiento al Ingeniero Arturo Macedo Silva quien fue nuestro asesor de tesis y al Ingeniero Alfonso Huaman Valencia, por el apoyo y asesoramiento profesional que nos brindaron en el desarrollo del proyecto de investigación.

Nuestro agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica por ser parte de nuestra formación académica.

Bach. Hernan Cortez Farfan.

Bach. Jonathan Uscamayta Lines.

INTRODUCCION

El desarrollo del presente trabajo de investigación de tesis constituye la evaluación de las emisiones de los productos de la combustión de un motor gasoliner Toyota 1S de 1.8L utilizando la mezcla gas natural e hidrógeno, mediante un módulo experimental.

En el capítulo I, titulado, Planteamiento de la Investigación, describimos y formulamos el problema, mencionamos la hipótesis, objetivos, variables, justificaciones, alcances y limitaciones del presente trabajo de investigación.

En el capítulo II, titulado, Marco Teórico, describimos las características técnicas del motor 1S de 1,8 L y mencionamos el marco referencial del gas natural e hidrógeno y la problemática de los motores de combustión interna respecto a la contaminación ambiental.

En el capítulo III, titulado, Construcción del Equipo Generador de Hidrogeno, describimos el procedimiento de construcción y montaje e indicamos los componentes que se utilizaron. Adjuntamos un reporte fotográfico y la teoría de cálculo para la producción de HHO.

En el capítulo IV, titulado, Adaptación del Kit de GNV y Equipo Generador de Hidrogeno al Motor, describimos el procedimiento de adaptación del Kit de GNV de tercera generación y Equipo Generador de Hidrógeno, posteriormente adjuntamos un reporte fotográfico.

En el capítulo V, titulado, Evaluación Experimental, describimos las pruebas realizadas para cada combustible y adjuntamos un reporte fotográfico. Determinamos los productos de la combustión, parámetros de desempeños del motor, consumo de los combustibles a diferentes regímenes y la potencia en ralentí. Analizamos los resultados por el análisis estadístico ANOVA y método de Tukey, por último se adjuntó los costos y ahorros de los combustibles en estudio.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo la evaluación de las emisiones de los productos de la combustión de un motor gasoliner Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrógeno a las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco mediante la implementación de un módulo experimental.

El proyecto consta de cinco capítulos que van relacionados directamente con los objetivos específicos, donde se detallan los trabajos realizados.

Con las experimentaciones desarrolladas y analizadas mediante el análisis estadístico ANOVA y con el método de Tukey, se llegó a la conclusión que con la utilización de la mezcla gas natural e hidrógeno se obtiene una buena combustión dentro de la cámara, lo que conlleva a la disminución de las emisiones de gases contaminantes tales como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos no quemados (HC).

ABSTRACT

Environmental pollution is a great problem, especially in countries where fossil fuels are used frequently. Natural gas can be used in an internal combustion engine, because the combustion is cleaner than gasoline. Countries like Peru don't have many fossil fuel reserves and depend on oil import from Middle East Asian Countries, but these fossil fuel have negative impact on air quality, for example in Cusco City, where the automotive park has increased. The use of CNG in internal combustion engines improvement the emission of gases of pollution, but the performance of the engine can be improved more by addition of small percentages of hydrogen, as the hydrogen hat higher calorific power than natural gas, also the flame speed is higher. The electrical cars come in the future but it is a short step to promote hydrogen in automobiles. The emission of gases by running engine was done separately on gasoline, natural gas and finally with the mixture natural gas and hydrogen; the results show a significant decrease in CO, HC and CO₂ emissions. All of this was done in a specific engine, with different engines revolutions and in Cusco City.

INDICE GENERAL

PRESENTACION	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
INTRODUCCIÓN	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE GRAFICOS	XIV
INDICE DE FIGURAS.....	XV
INDICE DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	XVI
GLOSARIO DE TERMINOS.....	XX
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Formulación del Problema	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Variables.....	5
1.7. Alcances y Limitaciones.....	6
1.8. Operacionalización de Variables.....	7
CAPITULO II.....	8
MARCO TEORICO.....	8
2.1. Estado del Arte	9
2.2. Motor de Combustión Interna Alternativo	12
2.2.1. Clasificación.....	12
2.3. Motor Gasolineroy Toyota 1S	14
2.3.1. Elementos principales.....	14
2.3.2. Sistemas.....	14

2.3.3. Sensores	17
2.4. Combustión.....	17
2.4.1. Tipos	17
2.4.2. Cámara de combustión	18
2.5. Influencia de Diferentes Factores sobre el Proceso de Combustión	21
2.6. Principales Alteraciones de la Combustión Normal.....	25
2.7. Gas Natural.....	25
2.7.1. Definición	26
2.7.2. Clasificación	26
2.7.3. Composición.....	26
2.7.4. Propiedades.....	26
2.7.5. Motores encendidos por chispa a gas natural	28
2.7.6. Tecnología para la conversión.....	29
2.7.7. Particularidades del funcionamiento del motor.....	32
2.8. Hidrogeno	34
2.8.1. Definición	34
2.8.2. Propiedades.....	35
2.8.3. Métodos de producción	36
2.8.4. Diferencia entre H ₂ , HHO y MHHO	38
2.8.5. Motor encendido por chispa a hidrógeno	40
2.8.6. Mezclas de combustible.....	41
2.9. Problemática de los Motores de Combustión Interna.....	41
2.9.1. Normativa EURO	42
2.9.2. Normativa sobre las emisiones en el Perú	43
2.9.3. Emisión de gases productos de la combustión	43
CAPITULO III.....	47
CONSTRUCCION DEL EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO	47
3.1. Descripción.....	48
3.2. Componentes	49
3.3. Construcción.....	50
3.4. Esquema del Sistema.....	52

3.5. Reporte Fotográfico.....	53
3.6. Cálculos	56
CAPITULO IV	58
ADAPTACIÓN DEL KIT DE GNV Y EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO AL MOTOR	58
4.1. Construcción de la Estructura de Soporte del Motor.....	59
4.2. Kit de Gas Natural Vehicular	60
4.3. Generador de Hidrogeno	63
4.4. Reporte Fotográfico.....	64
CAPITULO V	68
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	68
5.1 Pruebas	69
5.1.1. Productos de la combustión y consumos	69
5.1.2. Comportamiento de la potencia del motor en ralentí	90
5.2 Determinación de los Productos de la Combustión.....	97
5.3 Parámetros de Desempeño	124
5.4 Análisis de Resultados.....	138
5.5 Precio y Ahorro de los Combustibles.....	151
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	154
BIBLIOGRAFIA.....	155
ANEXOS.....	157

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables.

Tabla 2. Componentes del Generador de Hidrogeno.

Tabla 3. Materiales y Herramientas de Soporte Motor.

Tabla 4. Componentes Kit de GNV de Tercera Generación.

Tabla 5. Resultados de los Productos de la Combustión.

Tabla 6. Componentes Eléctricos Banco de Focos.

Tabla 7. Materiales Banco de Focos.

Tabla 8. Variación de RPM y Voltaje del Sistema.

Tabla 9. Resultados Obtenidos de Potencia Eléctrica en Ralentí.

Tabla 10. Potencia Eléctrica con Batería motor y Externa.

Tabla 11. Valores de los Productos de la Combustión para G-90P.

Tabla 12. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para G-90P.

Tabla 13. Valores de los Productos de la Combustión para GNV.

Tabla 14. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para GNV.

Tabla 15. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 1.

Tabla 16. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 1.

Tabla 17. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 2.

Tabla 18. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 2.

Tabla 19. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 3.

Tabla 20. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 3.

Tabla 21. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 4.

Tabla 22. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 4.

Tabla 23. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 5.

Tabla 24. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 5.

Tabla 25. Valores de los Parámetros de Desempeño del Motor en Ralentí.

Tabla 26. Tabla de Datos consumos.

Tabla 27. Valores de Consumo de Aire y Combustible.

Tabla 28. Plan de Análisis de Datos.

Tabla 29. Valores de CO en Ralentí.

Tabla 30. Análisis de Varianza de un Factor.

Tabla 31. Resultados de Análisis de Varianza.

Tabla 32. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

Tabla 33. Resumen de Valores del Análisis de Varianza (mezclas).

Tabla 34. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

Tabla 35. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

Tabla 36. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

Tabla 37. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

Tabla 38. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

Tabla 39. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

Tabla 40. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

Tabla 41. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

Tabla 42. Resumen de Valores del Análisis de Varianza (régimen de giro).

Tabla 43. Análisis por Grupos para HSD de CO para Regímenes.

Tabla 44. Análisis por Grupos para HSD de HC para Regímenes.

Tabla 45. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Regímenes.

Tabla 46. Costo de kg de GNV.

Tabla 47. Resultado de Ahorro de Combustible.

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Comportamiento de la Potencia del Motor en Ralentí.

Gráfico 2. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para G-90P.

Gráfico 3. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para GNV.

Gráfico 4. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 1.

Gráfico 5. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 2.

Gráfico 6. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 3.

Gráfico 7. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 4.

Gráfico 8. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 5.

Gráfico 9. Emisiones de CO.

Gráfico 10. Emisiones de HC.

Gráfico 11. Emisiones de CO₂.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del Fenómeno de Detonación. Sergio Angel Antonio López Rojas; Página 25; 2008.

Figura 2. Electrolizador Tipo Celda Húmeda. Estudio, Diseño y construcción de un Generador de Hidrógeno por electrólisis; 2012; Página 108.

Figura 3. Electrolizador Tipo Celda Seca. Estudio, Diseño y construcción de un Generador de Hidrógeno por electrólisis; 2012; Página 109.

INDICE DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
HC	Hidrocarburos sin quemar
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
ppm	Partículas por millón
GLP	Gas Licuado de Petróleo
ANOVA	Análisis de Varianza
GNV	Gas Natural Vehicular
H ₂	Hidrógeno Molecular
λ	Coefficiente de Exceso de Aire
HCNG	Mezcla de Hidrógeno con Gas Natural Comprimido
OHC	Encima de la cabeza de culata
ECU	Unidad Central Electrónica
PCV	Sistema de Ventilación Positiva de Cáster
TPS	Sensor de posición de mariposa
CKP	Sensor de posición de Cigüeñal
ϕ_{max}	Angulo de avance al encendido máximo
P.M.S	Punto Muerto Superior
P_{max}	Presión máxima
T_{max}	Temperatura máxima
CH ₄	Metano

C_2H_6	Etano
C_3H_8	Propano
C_4H_{10}	Butano
C_5H_{12}	Pentano
a/c	Relación aire-combustible
MJ	Mega Joule
m^3	Metro Cúbico
$^{\circ}C$	Grados Centígrados
K	Grados Kelvin
uma	Unidad de Masa Atómica
HHO	Gas Oxihidrógeno
GNL	Gas Natural Licuado
RON	Número de Octano
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
CNC	Torno de Control Numérico
Q	Carga Eléctrica
F	Constante de Faraday
z	Número de Valencia de una sustancia como ión en una solución
N_A	Número de Avogadro
M	Masa Molar de la Sustancia
I	Intensidad de Corriente Eléctrica
t	Tiempo
O_2	Oxígeno Molecular

A	Amperios
V	Voltaje
W	Watts
NaOH	Hidróxido de Sodio
P.E.	Potencia Eléctrica
C_8H_{18}	Gasolina
N_p	Número de moles de los productos
$h_{f,p}$	Entalpías de los productos
N_r	Número de moles de los reactivos
$h_{f,r}$	Entalpías de los reactivos
h_c	Entalpía de Combustión
P_{ele}	Potencia cedida por el alternador
V_{cc}	Voltaje en corriente continua
I_{cc}	Intensidad de corriente continua
η_g	Rendimiento del alternador
η_m	Rendimiento de la transmisión (correa)
p	Pérdidas en el alternador
N_e	Potencia al freno del motor
n	Velocidad de rotación del cigueñal
M_e	Momento efectivo del motor
V_h	Cilindrada del motor
x	Número de revoluciones necesarias por cada carrera de potencia
P_{me}	Presión media efectiva del motor

G_a	Consumo horario de aire
ρ_a	Densidad del aire
v_a	Velocidad del aire
A_{ad}	Área de sección de ingreso de aire
P_o	Presión atmosférica
T_o	Temperatura atmosférica
η_v	Coefficiente de llenado
τ	Número de tiempos del motor
V_g	Volumen de gasohol
t_g	Tiempo de funcionamiento con gasohol
ρ_g	Densidad del gasohol 90 plus
g_c	Consumo de gasohol 90 plus
R	Coefficiente de gases ideales
Z	Factor de compresibilidad
V	Volumen
Ho	Hipótesis Nula
Ha	Hipótesis Alterna
F	Distribución de Fisher
HSD	Diferencia honestamente significativa
g	Gramos

GLOSARIO DE TERMINOS

Gasohol 90 plus: Es un combustible ecológico que resulta de la mezcla de 92% de gasolina y 7,8% de alcohol carburante, según las especificaciones técnicas emitidas por PetroPeru.

Ralentí: Es el régimen mínimo de revoluciones por minuto a las que se ajusta un motor de combustión interna para permanecer en funcionamiento de forma estable sin necesidad de accionar un mecanismo de aceleración o entrada de carburante.

Solución: Es la mezcla homogénea de una o más sustancias disueltas en otra sustancia en mayor proporción. Está compuesta por soluto y solvente.

Soluto: Es la sustancia que se disuelve en una solución.

Solvente: Es la sustancia en que se disuelve un soluto. Es el componente que se encuentra en mayor proporción en la solución.

Hidróxido de sodio: Es una sustancia química compuesta por sodio, hidrógeno y oxígeno altamente corrosiva cuya fórmula es NaOH. También conocido como soda cáustica o sosa cáustica.

Mezcla 1: GNV y 3% HHO, al 3% HHO se utilizó 1000 gramos de agua y 30 gramos de soda caustica (que representa el 3% de solvente) para la producción de hidrógeno.

Mezcla 2: GNV y 4% HHO, al 4% HHO se utilizó 1000 gramos de agua y 40 gramos de soda caustica (que representa el 4% de solvente) para la producción de hidrógeno.

Mezcla 3: GNV y 5% HHO, al 5% HHO se utilizó 1000 gramos de agua y 50 gramos de soda caustica (que representa el 5% de solvente) para la producción de hidrógeno.

Mezcla 4: GNV y 5% HHO, al 5% HHO se utilizó 1000 gramos de agua y 50 gramos de soda caustica (que representa el 5% de solvente) para la producción de hidrógeno. Se dio las mejores

condiciones de funcionamiento al motor en ralentí (561, 3 rpm), para lo cual se regulo el ingreso de gas natural.

Mezcla 5: GNV y 5%HHO, al 5%HHO se utilizó 1000 gramos de agua y 50 gramos de soda caustica (que representa el 5% de solvente) para la producción de hidrógeno. Se dio las mejores condiciones de funcionamiento al motor en régimen alto (de 2065 rpm a 2659 rpm), para lo cual se regulo el ingreso de gas natural.

Análisis de varianza ANOVA: Es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas.

Método de Tukey: La prueba de rango de Tukey, también conocida como prueba de Tukey, prueba de significación honesta de Tukey, es un procedimiento de comparación múltiple y prueba estadística de un solo paso.

Ecuación de reacción: Es la expresión cuantitativa de las sustancias y de las proporciones en las que éstas intervienen en el proceso de combustión.

Cátodo: Es un electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

Ánodo: Es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

Catión: Es un ión (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.

Anión: Es un ión con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado más electrones.

Ión: Es una sub-partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

Celda seca: Es un electrolizador, es decir, es un dispositivo utilizado para generar hidrógeno y oxígeno mediante el principio de electrólisis del agua, éste contiene el electrolito dentro de sí.

Electrolito: Es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.

Decreto Supremo: Es una orden escrita del Presidente de la República que, dictada dentro de la esfera de su competencia, lleva la firma del o de los ministros de Estado y está sujeta a tramitación especial

Material pétreo: Son materiales inorgánicos, naturales o procesados por el hombre que derivan de la roca o poseen una calidad similar a la de ésta.

Cascabeleo: Es el resultado de una combustión en un momento incorrecto en el motor.

Relación aire/combustible: Es una razón que representa la cantidad en masa o volumen, de aire aspirado por un motor de combustión para una cantidad unitaria de combustible.

Temperatura de ignición: A condiciones normales de presión y temperatura, es la temperatura mínima necesaria para que la materia empiece a arder y la llama se mantenga sin necesidad de añadir calor exterior.

Velocidad de combustión: Es la velocidad a la cual se empieza a propagar el frente de llama.

Relación de compresión: Es un número que permite medir la proporción en volumen que se ha comprimido la mezcla aire-combustible dentro de la cámara de combustión.

Etil mercaptano: Es un gas incoloro o un líquido claro con un color distintivo, también conocido como “gas hedor”.

Cianobacteria: División a la que pertenecen los organismos procariotas unicelulares que carecen de núcleo definido.

Hidrogenasa: Es una enzima que cataliza la oxidación reversible de hidrógeno molecular y juega un papel central en el metabolismo microbiano.

Catalizador: Se trata de un dispositivo instalado en el tubo de escape, cerca del motor, ya que ahí los gases mantienen una temperatura elevada.

Resolución Ministerial: Se trata de una normativa o de una regla que dicta un ministerio de acuerdo a las facultades que le otorga la Constitución.

Hemoglobina: Pigmento rojo contenido en los hematíes de la sangre de los vertebrados, cuya función consiste en captar el oxígeno de los alveolos pulmonares y comunicarlo a los tejidos.

Aldehídos: Son compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional – CHO (formilo).

Fenol: También llamado ácido carbónico en su forma pura es un sólido cristalino de color blanco-incoloro a temperatura ambiente.

Lluvia ácida: Fenómeno que se forma cuando la humedad del aire se combina con óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre o trióxido de azufre emitidos por las fábricas y vehículos.

Gas oxihidrógeno: HHO, es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en proporción que se asume 2:1, la misma proporción del agua.

Electrodo: Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, el vacío, el gas, etc.

Tacómetro: Instrumento usado para medir la velocidad de rotación de un mecanismo de la máquina al que va acoplado.

Entalpía de Combustión: Corresponde a la energía liberada en forma de calor, en una reacción de combustión de 1 mol de sustancia.

Temperatura de flama adiabática: A volumen constante es la temperatura que resulta de un proceso de combustión completa que ocurre sin cualquier trabajo, transferencia de calor o cambios en cinética o energía potencial.

Coefficiente de llenado: Es la relación entre la masa de aire aspirada efectivamente en cada ciclo y la que teóricamente podría llenar un volumen igual a la cilindrada, en las condiciones de presión y temperatura exteriores.

Estadístico F: Es una estimación de la varianza poblacional basada en la variabilidad existente entre las medias de cada grupo.



CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION



PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del Problema

Nuestro planeta está atravesando por la crisis medioambiental más grande de toda nuestra historia. Durante el siglo XX y XXI, sale a evidencia las verdaderas ventajas y desventajas del uso de combustibles fósiles y es el sector del parque automotor e industrial quienes develaron la verdadera sostenibilidad de estos combustibles, presentándose fenómenos adversos que atentan contra la vida existente en nuestro planeta, conocidos como, contaminación ambiental, efecto invernadero, calentamiento global, etc. Es así que los gobiernos y las empresas viendo el problema en su real magnitud motivan a realizar investigaciones relacionadas al uso de energías renovables, combustibles alternativos, sistemas de reducción de emisión de gases, etc.

En la actualidad la ciudad del Cusco se ve cada vez más afectada por los problemas ambientales (calidad del aire) y una de las causas es el excesivo crecimiento del parque automotor gasolinero que trae consigo la emisión desmedida de los productos de la combustión tales como, CO, CO₂, HC y NO_x, trayendo consigo, efectos negativos para la salud pública. La ciudad del Cusco está dentro de la zonas de atención prioritaria aprobado mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM.

En los últimos 17 años a partir del 2000 hasta el 2017, el parque automotor del departamento de Cusco se incrementó de 29251 unidades hasta 98134 unidades. (Públicos, 2017)

La exposición al monóxido de carbono puede exacerbar las enfermedades del corazón y del pulmón. El peligro es más evidente en neonatos, ancianos y personas que sufren de enfermedades crónicas. El porcentaje de monóxido de carbono de las emisiones contaminantes procedentes de fuentes móviles en la ciudad del Cusco representa un 60% del total. (Perú, 2013-2014, pág. 24),



asimismo, la emisión de monóxido de carbono proveniente del parque automotor es de 6848,9 toneladas por año. (Cusco, 2003, pág. 12)

El dióxido de carbono combinado con agua produce el ácido carbónico, que afecta a los materiales orgánicos y produce corrosión en los materiales pétreos y el vidrio. (Bellido Márquez, 2016), Asimismo, la prueba de carbono 14 se ve amenazada por el incremento del mismo. (Uribarri, 2018)

La concentración de dióxido de carbono influencia en un 92% en el incremento de la temperatura y en un 99% en el incremento de las precipitaciones en el valle de Cusco, siendo la concentración promedio de 40 ppm. (Alzamora Taype & Poblete Loyola, 2012, págs. 6 y 80-81)

El gas natural es un combustible que desde inicios del siglo actual se ha ido desarrollando en el mercado peruano, todo esto gracias a los yacimientos de gas natural que posee nuestro país (lotes de Camisea).

Por otro lado, el hidrógeno es considerado como un vector energético, el cual se usa en la generación de electricidad y como combustible complementario, dando resultados alentadores, los cuales promueven a mayores investigaciones en cuanto a su manipulación y costos de obtención. Teniendo las condiciones geográficas de la ciudad del Cusco, se proyecta como alternativa el uso de la mezcla de gas natural e hidrógeno, la cual podría traer consigo características de un combustible que de manera independiente, tanto el gas natural como el hidrógeno no las poseen.

Por todo lo expuesto anteriormente, se evaluará experimentalmente las emisiones de los productos de la combustión de un motor gasoliner Toyota 1S de 1.8L utilizando la mezcla gas natural e hidrógeno a las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.



1.2. Formulación del Problema

¿Cómo evaluar la emisión de los productos de la combustión de un motor gasoliner Toyota 1S de 1.8L, utilizando gas natural e hidrógeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco?

1.3. Justificación

El presente proyecto de investigación es de mucha importancia para la ciudad del Cusco por ser una alternativa de solución a la disminución de la emisión de los productos de combustión en motores encendidos por chispa. El módulo experimental que se pretende construir va relacionado directamente al parque automotor de vehículos gasolineros, todo ello para la evaluación de la emisión de los productos de la combustión a las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.

El gas natural como combustible presenta un costo relativamente bajo frente a la gasolina y el GLP, además en ciudades con relativa altitud sobre el nivel de mar se ha tenido reducciones considerables en la emisión de los productos de la combustión en motores encendidos por chispa. La conversión de unidades vehiculares a gas natural no es compleja ni modifica la estructura del motor.

Para poder obtener mejores resultados en la emisión de los productos de la combustión se pretende adicionar hidrógeno al gas natural, ya que las propiedades individuales (velocidad de llama, poder calorífico, etc.) de estos combustibles según estudios se ven mejoradas cuando se combinan, todo esto para el objetivo concreto de la disminución de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos no quemados (HC).



1.4. Objetivos

Objetivo general

- Evaluar experimentalmente la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolineroy Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrógeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.

Objetivos específicos

- Construir el equipo generador de hidrógeno.
- Adaptar el kit de conversión de gas natural y equipo generador de hidrógeno al motor.
- Determinar los productos de la combustión del motor utilizando gasolina y la mezcla gas natural e hidrógeno mediante el uso de un analizador de gases.
- Calcular los parámetros de desempeño del motor utilizando gasolina y la mezcla gas natural e hidrógeno.

1.5. Hipótesis

Es posible utilizar la mezcla gas natural e hidrógeno en un motor gasolineroy Toyota 1S de 1.8L y disminuir la emisión de los productos de la combustión bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.

1.6. Variables

Variables Independientes

- Régimen de giro del motor.
- Mezcla gas natural e hidrógeno.

Variable Dependiente

- Productos de la combustión



1.7. Alcances y Limitaciones

Alcances

- La presente experimentación evaluará la emisión de los productos de la combustión al utilizar la mezcla gas natural e hidrógeno en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones de la ciudad de Cusco mediante un módulo experimental.
- El presente trabajo servirá de base a futuras investigaciones en lo que respecta al uso de combustibles alternativos amigables con el medio ambiente, aplicable al parque automotor de la ciudad de Cusco.

Limitaciones

- Todos los resultados obtenidos se limitarán a las características del motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L.
- Se adaptó al motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L un kit de tercera generación para su funcionamiento a gas natural.
- La cantidad de hidrógeno que se adicionara al gas natural se limitara a la producción del generador de hidrógeno.
- Los valores de la emisión de los productos de la combustión se medirán sin catalizador de gases.
- No se podrá determinar las curvas características de potencia, torque y consumo específico de combustible del motor, debido a que la ciudad del Cusco no cuenta con un taller implementado con dinamómetro.



1.8. Operacionalización de Variables

En el siguiente cuadro se muestra las variables de estudio del proyecto de investigación.

Tabla 1. Variables.

VARIABLES INDEPENDIENTES		PROCESAMIENTO DE DATOS		VARIABLE DEPENDIENTE
Régimen (rpm)	Mezcla de Gas Natural e Hidrogeno	Análisis Estadístico	Método	Productos de la Combustión
Ralentí	Mezcla 1	ANOVA	TUKEY	CO, HC, CO ₂ y O ₂
	Mezcla 2			
	Mezcla 3			
	Mezcla 4			
	Mezcla 5			
2000	Mezcla 1	ANOVA	TUKEY	CO, HC, CO ₂ y O ₂
	Mezcla 2			
	Mezcla 3			
	Mezcla 4			
	Mezcla 5			
3000	Mezcla 1	ANOVA	TUKEY	CO, HC, CO ₂ y O ₂
	Mezcla 2			
	Mezcla 3			
	Mezcla 4			
	Mezcla 5			

Fuente: Elaboración Propia.



CAPITULO II
MARCO TEORICO



MARCO TEORICO

2.1. Estado del Arte

Desarrollo del combustible Híbrido Gaseoso (GNV+H₂) en motores de transporte público y de carga

La creciente motorización global vehicular, unida a la disminución de las reservas de petróleo y la imperiosa necesidad de restringir la emisión de gases contaminantes, ha impulsado el desarrollo de combustibles alternativos en reemplazo de los tradicionales. Se trabajó en el proyecto de utilizar en motores ciclo OTTO un nuevo combustible gaseoso constituido al mezclar GNV con porcentajes variables de Hidrógeno (5% al 30%). El programa de investigación en el laboratorio consiste en el ensayo comparativo en dinamómetro de un motor actual normal de producción al funcionar con combustibles líquido y gaseosos (GNV, GLP y GNV+H₂), verificándose su performance, consumo y emisiones contaminantes, con la premisa de que en el motor, para optimizar los resultados se podrán únicamente realizar modificaciones en la calibración original en los sistemas: encendido, alimentación de combustibles gaseosos y riqueza de mezcla.

Conclusiones

Con los combustibles gaseosos, se logra disminuir el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes, a excepción de los NO_x.

Las experiencias efectuadas con el combustible híbrido al 5% de H₂, incentivan a efectuar ensayos con mayores porcentajes de H₂, para así poner en evidencia la potencialidad de las características que presenta este combustible al ser combinado con GNV.

Las modificaciones que se deberían efectuar son:



Determinar la concentración de H_2 para lograr el punto de equilibrio entre rendimiento energético y emisiones de contaminantes.

Investigar la relación λ , para la cual se logra la menor emisión de contaminantes, con un correcto funcionamiento del motor para diferentes relaciones de la mezcla ($GNV + H_2$). (Tigubó, Galante, Macchello, Franzi, & Baglioni, 2011)

Análisis Comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano

En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad de las propiedades de combustión del gas natural respecto a las mezclas metano-hidrógeno en las que la composición de hidrógeno en porcentaje en volumen no excede al 15%. Los resultados encontrados nos muestran una disminución general del valor de las propiedades volumétricas comparadas con el metano, cuya composición fue la referencia de este análisis.

Conclusiones

Al adicionar hidrógeno a un gas natural cuya composición química es en un alto porcentaje metano, las propiedades volumétricas de combustión disminuyen su valor y presentan una alta sensibilidad a estas adiciones. El origen de lo anterior radica básicamente en el menor requerimiento de volumen de aire por parte del hidrógeno para realizar una combustión estequiométrica.

Se obtienen menores emisiones de CO_2 , el cual es tema de vital importancia en cuanto a la disminución del efecto invernadero.

Teniendo en cuenta que al adicionar hidrógeno al gas natural se tiene una disminución en el requerimiento de volumen de aire para realizar una combustión estequiométrica, las dosificaciones de hidrógeno se presentan como una alternativa para la utilización del gas natural a grandes alturas,



donde la cantidad de oxígeno en el aire es menor. Lo anterior sería para que el gas natural no pierda competitividad con otros energéticos como la electricidad, que no se afectan con el incremento de la altura sobre el nivel del mar. (García Posada, Amell Arrieta, & Burbano Martínez, 2006)

Hydrogen enriched Compressed natural gas (HCNG)-a futuristic fuel for internal combustion engines

La contaminación del aire se está convirtiendo en un serio problema global con incrementos de contaminación. Una de las soluciones planteadas en este estudio, es poder envasar el hidrógeno en un tanque con el metano. Enriquecer el gas natural con hidrógeno podría ser un potencial alternativo a los comunes hidrocarburos para aplicaciones en un motor de combustión interna.

Conclusiones

Es evidente del estudio realizado, que es ventajoso el uso de Hidrógeno-Gas Natural Comprimido como un combustible en los motores de combustión interna. Adicionar hidrógeno al GNV como un combustible en motores encendidos por chispa, otorga un significativo y positivo impacto en la eficiencia, especialmente cercanos a los límites de mezcla pobre. Hidrógeno-Gas Natural Comprimido hace esto posible al hacer funcionar al motor con mezclas más pobres, resultando esto en bajas emisiones de CO₂, CO y HC en cierto λ y más altas emisiones de NO_x en ratio constante. Futuros desarrollos experimentales podrían optimizar la emisión de los contaminantes urbanos y CO₂ de acuerdo con la reducción del consumo específico de combustible, así encontrando en futuras investigaciones un más amplio espectro de λ , avance de chispa, ratio de compresión y porcentaje de hidrógeno en los tanques. Finalmente ha sido concluido que el combustible Hidrógeno-Gas Natural Comprimido construye el camino para que el uso del hidrógeno en vehículos en el futuro sean baratos después del desarrollo de tecnologías venideras. Si bien la mayoría de trabajos de investigación de Hidrógeno-Gas Natural Comprimido refieren a



motores encendidos por chispa, también existen buses pesados que funcionan con GNV, los cuales también pueden usar HCNG. Con este potencial se puede superar las normas más estrictas para los motores diésel en la India. (Nanthagopal, Subbarao, Elango, Baskar, & Annamalai)

2.2. Motor de Combustión Interna Alternativo

Es un conjunto de mecanismos completamente sincronizados que aprovechan la energía calorífica de los combustibles para obtener una energía mecánica de movimiento circular, por medio de un proceso de combustión producido dentro de las cámaras ubicadas en el motor.

2.2.1 Clasificación

Según la forma de provocar la ignición o encendido de la mezcla

- **Motor Otto:** Cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, se basan en el principio de ignición o combustión a volumen constante. La llamada chispa existente en estos motores es provocada debido al paso de una corriente eléctrica entre dos electrodos. Los combustibles utilizados son gaseosos en algunos casos y más comúnmente hidrocarburos con fácil evaporación, por lo que deben ser ligeros y altamente inflamables. El dispositivo capaz de producir la ignición es llamada bujía y consiste en un conductor fijado a la pared superior de cada cilindro. Su función principal es el control del paso de la corriente y, por ende, la producción del arco eléctrico causante de la chispa. De esta forma, la bujía ayuda en los problemas relacionados en la vida útil poco duradera de los componentes de la cámara de combustión, actúa como disipador del calor de la cámara y reduce el riesgo de una explosión cuando no quiera ser producida. Como inconveniente, este tipo de motores se limitan a valores de relación de compresión que varían de 6 a 10 dentro del cilindro, ya



que al alcanzar grandes presiones se corre el riesgo de una explosión espontánea del fluido activo.

- **Motor Diésel:** Llamado así en honor al ingeniero alemán nacido en Francia Rudolf Diésel, se basan en el principio de encendido a presión constante. El encendido se genera por medio de la autoinflamación del fluido activo, ocasionado por una compresión lo suficientemente elevada que sea capaz de provocarla y por una alta temperatura al llevar a cabo dicho proceso. Razón por lo que es necesario el uso de un combustible con menor volatilidad y peso específico. Los valores de la relación de compresión en este caso pueden alcanzar hasta una magnitud de 22.

Según su ciclo operativo

Ciclo de cuatro tiempos (4T): Estos motores efectúan una carrera útil de trabajo cada dos vueltas del cigüeñal o cuatro carreras de pistón. La renovación de la carga se controla mediante la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape.

- **Tiempo de Admisión:** El aire y el combustible mezclados entran por la válvula de admisión.
- **Tiempo de Compresión:** La mezcla de aire/combustible es comprimida y encendida mediante la bujía.
- **Tiempo de expansión:** El combustible se inflama, se produce la combustión y el pistón es empujado hacia abajo.
- **Tiempo de escape:** Los gases de escape conducen hacia fuera a través de la válvula de escape.

Dos tiempos (2T): Estos motores efectúan una carrera útil de trabajo en cada vuelta de cigüeñal o dos carreras de pistón. La renovación de la carga se logra por barrido, sin la necesidad de válvulas



(en los diésel lleva de escape), ya que es ahora el propio émbolo el que con su movimiento descubre las lumbreras de admisión y escape regulando el proceso (solo ciclo Otto).

- Tiempo de compresión y aspiración: El pistón ascendente comprime la mezcla de aire, combustible y algo de aceite en el cilindro y simultáneamente crea un vacío en el cárter que al final de la carrera del pistón, este deja libre la lumbrera de aspiración o preadmisión que llena el cárter con mezcla carburada de gasolina.
- Tiempo de expansión y escape: Mediante una chispa provocada por la bujía se enciende la mezcla comprimida, creando una explosión que empuja el pistón con gran fuerza hacia abajo. En el cárter la mezcla es precomprimida por el pistón descendente, en el momento preciso el pistón deja libre el canal de escape o lumbrera de escape en el cilindro por donde salen los gases de escape de este y poco después la lumbrera de carga que conecta el cárter con el cilindro, por lo que la mezcla precomprimida pasa por este llenando el cilindro y expulsando los últimos restos de los gases de escape.

2.3. Motor Gasoliner Toyota 1S

Nuestro proyecto cuenta con un motor de cuatro tiempos de ciclo Otto con un sistema de inyección monopunto indirecta, con cuatro cilindros distribuidos en línea y con pistones de simple efecto.

2.3.1 Elementos principales

- Tapa de válvulas
- Culata
- Bloque
- Cárter

2.3.2 Sistemas



- **Sistema de admisión de aire:** Conjunto de elementos que permiten que ingrese el aire a las cámaras de combustión. El motor consta de un conducto de admisión, un múltiple de admisión y una válvula de mariposa.
- **Sistema de alimentación:** El sistema de alimentación del combustible consta de un depósito, una bomba, un filtro o vaso de sedimentación, un inyector el cual se encarga de mezclar el gasohol con el aire en las proporciones correctas para poder ser quemado y por último se encuentran las tuberías encargadas de llevar y retornar el combustible entre el cilindro y el inyector.
- **Sistema de distribución:** Es el sistema a través del cual se logra la apertura y cierre de las válvulas de admisión y de escape por medio del árbol de levas, dispositivo que a la vez es movido por el cigüeñal mediante una correa dentada. El motor presenta un sistema de distribución OHC y está formado por, el árbol de levas, muelles, dos válvulas por cilindro, guías de válvulas, elementos de mando, taqués y balancines.
- **Sistema de encendido:** El motor cuenta con un sistema electrónico, es un sistema que utiliza la ECU del motor para determinar el ajuste del encendido en base a las señales procedentes de diversos sensores. La ECU del motor calcula el ajuste del encendido utilizando el ajuste del encendido óptimo almacenado en la memoria para que se ajuste a las condiciones del motor y después envíe la señal al dispositivo de encendido. El ajuste del encendido óptimo se determina básicamente utilizando el régimen del motor y la masa del aire de admisión (presión del colector).
- **Sistema de refrigeración:** Para poder liberar las altas temperaturas dentro del motor se cuenta con sistema de refrigeración por agua, el cual mediante una bomba de recirculación circula por los conductos dentro del motor y el calor recogido lo libera en



un radiador que ayudado por un electro ventilador liberan la mayor cantidad de calor. Además cuenta con un termostato, un tapón para el radiador, una manguera superior y una manguera inferior.

Sistema de ventilación positiva del cárter PCV: La ventilación positiva del cárter es un sistema que fue desarrollado para remover vapores dañinos del motor y prevenir que esos vapores sean expedidos a la atmósfera. El sistema PCV lleva a cabo esto mediante un cabezal de vacío para retirar los vapores del cárter hacia el múltiple de admisión. De ahí los vapores son llevados junto con la mezcla aire-combustible a la cámara de combustión en donde son quemados. El flujo o circulación dentro del sistema está controlado por la válvula PCV. La válvula PCV es efectiva como un sistema de ventilación del cárter y como un mecanismo de control de contaminación.

La parte más crítica del sistema PCV es la válvula de control de flujo, comúnmente llamada válvula PCV. El propósito de la válvula PCV es regular el flujo de vapores del cárter al múltiple de admisión. Esto es necesario para proporcionar la ventilación adecuada del cárter sin desajustar la mezcla aire-combustible para la combustión.

- ***Sistema de arranque:*** Para lograr el arranque se utiliza un motor eléctrico (motor de arranque) el cual se acopla durante el encendido del motor a la volante de inercia y se desacopla después de unos breves segundos.
- ***Sistema de lubricación:*** Son los distintos métodos de distribuir el aceite por todas las piezas del motor. El sistema del motor consta de una bomba de aceite, filtro de aceite, cárter (depósito de aceite) y una varilla de medición de nivel de aceite.
- ***Sistema de generación y almacenamiento:*** Este sub sistema del sistema eléctrico está constituido por la llave de contacto, alternador con regulador de voltaje, batería y fusible.



- **Sistema de escape:** Es el responsable de conducir hacia el exterior los gases de los productos de la combustión. El motor consta de un colector de escape, silenciador, conductos de evacuación y pernos de sujeción.

2.3.3 Sensores

Son transmisores que informan a la unidad de control electrónico del buen funcionamiento de los distintos elementos del motor. Lo que hace un sensor es utilizar una información física o química, filtrarla y convertirla en datos electrónicos que se envían a la centralita de forma que la unidad de control pueda comprenderla. El motor cuenta con los siguientes sensores:

- Sensor de temperatura de motor.
- Sensor de posición de mariposa (TPS).
- Sensor de revoluciones y punto muerto superior.
- Sensor de oxígeno.
- Sensor de temperatura de aceite.
- Sensor de posición de cigüeñal (CKP).
- Sensor de temperatura de refrigerante.
- Sensor de vacío.

2.4. Combustión

Se denomina proceso de combustión a un proceso de oxidación brusca o violenta de los elementos oxidables de una sustancia de características particulares, denominada combustible, mediante el cual la energía química del combustible se transforma en energía interna de los productos del proceso. (Postigo & Cruz, 2010, pág. 1)

2.4.1 Tipos



Combustión Completa o perfecta: Los componentes se oxidan completamente, formando dióxido de carbono y agua líquida.

Combustión Estequiométrica o neutra: Es una combustión completa en la que se ha empleado la cantidad exacta de aire obtenida a partir de las relaciones cuantitativas de las moléculas que intervienen en cada reacción. En realidad se trata de una combustión ideal, que solo puede conseguirse en laboratorio.

Combustión Incompleta: Es aquella cuyos gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados llamados inquemados, como monóxido de carbono, partículas de carbono, hidrógeno, etc.

2.4.2 Cámara de combustión

Es el lugar donde se realiza la combustión del combustible con el comburente, generalmente aire, en el motor de combustión interna. El motor cuenta con cámaras hemisféricas.

Tipos

Cámara cilíndrica: Este tipo es el más común por ofrecer una buena relación entre el coste de fabricación y prestaciones. Técnicamente, la cámara es una prolongación del propio cilindro por lo que las válvulas se sitúan de forma paralela entre ellas y el eje del cilindro, además, la bujía puede ir colocada lateralmente o paralela, también, a las válvulas. En este tipo la bujía se sitúa en contacto directo con la mezcla combustible-aire haciendo que su chispa la inflame de forma inmediata.

Cámara de bañera o cuña: La cavidad que da forma a la cámara cuenta con una angulación en uno o dos de sus lados, donde a su vez se sitúa la bujía (dispuesta lateralmente). En ella, las válvulas se sitúan en la culata para de esta forma eliminar la turbulencia que se genera en la



explosión de la mezcla. Una de sus ventajas es que las bielas sufren menor esfuerzo y por tanto se incrementa su durabilidad.

Cámara hemisférica o cúpula: Las válvulas se sitúan en los laterales y la bujía en la cúspide. Gracias a esta forma, el llenado del cilindro es más eficiente ya que permite emplear válvulas de mayor tamaño. Además, en ella el recorrido de la chispa (desde la bujía hasta la cabeza del pistón) es menor por lo que el nivel de la llama es mayor, permitiendo una potencia superior que en otros tipos de cámaras de combustión.

Consideraciones de una buena cámara de combustión

- Ser pequeña para reducir al mínimo la superficie que absorbe calor al inflamarse la mezcla combustible.
- No tener grietas o rincones que causen combustión espontánea o golpeteo (cascabeleo).
- Debe poseer un espacio para la bujía, en el centro de la cámara con el fin de reducir el tiempo necesario, para que se inflame toda la mezcla de combustible, ya que la velocidad con que avanza la llama de la combustión en la cámara está limitada.

Coefficiente de exceso de aire

El aire está compuesto por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), bajos niveles de gases inertes y una parte variable de vapor de agua (1%).

En la actualidad, los motores gasolineros cuentan con inyectores, quienes se encargan de dosificar a la cámara de combustión mezclas de aire y combustible en función a las exigencias y necesidades del motor. Estas mezclas de aire y combustible varían en el proceso de trabajo desde mezclas ricas en el arranque y en el desarrollo de máximas potencias, y mezclas pobres en el trabajo. La cantidad de aire teóricamente necesaria para la combustión de un kg. de combustible, se denomina coeficiente de exceso de aire (λ).



La cantidad de aire teóricamente necesaria se caracteriza porque representa la menor cantidad de oxígeno del aire que se necesita suministrar al combustible para su completa combustión, por lo tanto λ será igual a la unidad. Dicho en otras palabras al cilindro ingreso aire igual a la necesaria teóricamente; a esto se le denomina mezcla estequiométrica. Pero, no siempre se necesita λ sea igual a uno, ocurre que, necesitamos mezclas ricas y esto es cuando $\lambda < 1$ (0,85 – 0,90 en motores a gasolina), es decir existe una insuficiencia de oxígeno, asimismo, las mezclas pobres suceden cuando $\lambda > 1$, es decir existe exceso de oxígeno. (Jovaj, 1982, pág. 134)

Relación de aire-combustible

Esta proporción ha de permanecer lo más uniforme posible, dentro de unos estrechos márgenes de variación, se sitúa alrededor de 14 a 15 partes de aire en peso por cada parte de gasolina en peso, estando la mezcla estequiométrica aire/gasolina en 14,7:1.

Llama

Reacción de combustible que se propaga a través del espacio, a velocidad inferior a la del sonido. El concepto de llama implica el de movimiento y por consiguiente, un frente de avance de la reacción denominada frente de llama.

Para que tenga lugar la combustión se tiene que alcanzar la temperatura de ignición, muy superior a la del punto de inflamación que es aquella en la que el combustible está en condiciones de iniciar la combustión, pero si se retira la energía de activación, la llama se apaga. A partir de ello, todas las reacciones de combustión en sus distintas fases, tienen lugar en este medio gaseoso que es la llama. Una vez iniciada, si se aportan el combustible y comburente suficientes, a la misma velocidad con que se propaga el frente de llama, la llama se estabiliza y persiste, aunque se retire la energía de activación inicial.



La velocidad de propagación de la llama depende de cada combustible, de su mayor o menor grado de pureza y del exceso de aire con que se efectúa la combustión. La temperatura de la llama depende del poder calorífico, del exceso de aire y del tipo de hogar o cámara de combustión. Se conoce como temperatura teórica de llama adiabática a la mayor temperatura que se puede obtener de un combustible, la cual se alcanza cuando no hay exceso de aire. En cuanto al color, depende del combustible. En general se puede decir que deber ser clara y luminosa, sin productos humeantes. Cuando hay falta de aire, la llama se oscurece y humea debido a partículas de carbono incandescentes.

2.5. Influencia de Diferentes Factores sobre el Proceso de Combustión

De acuerdo al análisis realizado por (Jovaj, 1982, págs. 134-137), se indica:

Composición de la mezcla

La composición de la mezcla de trabajo (coeficiente de exceso de aire λ), ejerce influencia sobre la velocidad de combustión y la cantidad de calor desprendido, lo que se refleja en el cambio de la presión y de temperatura de los gases en el cilindro del motor. Los mejores resultados se obtienen para el caso de $\lambda=0,85-0,9$, en donde se observan las mejores velocidades de propagación de la llama y de intensidad en el desprendimiento de calor, por lo tanto la máxima potencia desarrollada por el motor. Esta composición de la mezcla se conoce como composición de potencia.

Carga del motor

A medida que disminuye la potencia del motor al cerrar un poco la mariposa de gases, decrecen las presiones iniciales y finales de compresión y se incrementa el grado de dilución de la mezcla de trabajo con los gases residuales. Esto conduce en primer lugar al considerable empeoramiento de las condiciones de ignición de la mezcla por la chispa y del desarrollo en ella del foco inicial de la combustión. La duración de la fase inicial correspondientemente crece y el proceso de



combustión se hace menos estable, incrementándose la desuniformidad de los ciclos separados. En cierta medida ayuda el enriquecimiento de la mezcla hasta obtener valores de λ (0,8...0,85), para los cuales se tiene un encendido más seguro para la chispa. Pero inclusive en este caso, por lo general, no se logra evitar el prolongamiento de la combustión en considerable parte de la carrera de expansión y garantizar el encendido sin intermitencias a grandes ángulos de avance, cuando las presiones de compresión son aún pequeñas. El desarrollo no satisfactorio de la combustión en los regímenes de pequeñas cargas y la necesidad en este caso del enriquecimiento de la mezcla constituyen una de las principales desventajas de los motores a gasolina de encendido por chispa que conducen al inútil consumo de combustible y a expulsar al medio ambiente, junto con los gases quemados, considerables cantidades de monóxidos de carbono e hidrocarburos de la combustión incompleta.

Relación de compresión

Cuando aumenta las relaciones de compresión ϵ , las presiones y las temperaturas de la mezcla de trabajo hacia el instante que salta la chispa se elevan y disminuye la concentración de los gases residuales. Simultáneamente se crean condiciones más favorables para la ignición de la mezcla por la chispa, se reduce la fase inicial de la combustión, aumentan los límites del empobrecimiento posible de la mezcla. Las elevadas presiones y temperaturas de la mezcla comprimida también contribuyen a la elevación de las velocidades de combustión en la fase principal, pero al mismo tiempo a elevadas ϵ se incrementa la relación de la superficie de la cámara de combustión con respecto a su volumen, como consecuencia de la cual crece la cantidad relativa de la mezcla que se encuentra en las capas cercanas a las paredes y en los expulsos, es decir, se incrementa la fracción de la mezcla que quema en la tercera fase. Todo esto en su conjunto conduce a que en los motores con elevados ϵ disminuyen los ángulos óptimos de avance al encendido (correspondientes



a la máxima potencia), se reduce la duración de la combustión hasta el instante en que se alcanza la máxima presión (el punto ϕ_{max} se acerca al P.M.S), pero simultáneamente con esto disminuye el coeficiente de desprendimiento de calor activo en los puntos P_{max} y T_{max} , crece el valor relativo de los procesos de combustión residual en la tercera fase.

Frecuencia de rotación

Al aumentar la frecuencia de rotación del cigüeñal del motor, el tiempo reservado al desarrollo del proceso de combustión disminuye y al mismo tiempo se incrementa la intensidad de turbulencia de la carga de trabajo. Por lo expuesto como ya se anotó, la velocidad con la que se propaga el frente de llama en la fase principal de combustión crece aproximadamente proporcional a la frecuencia de rotación, mientras que la duración de la fase principal, expresada en grados de rotación del cigüeñal, por lo general permanece constante. La duración de la fase inicial de combustión se incrementa con el crecimiento de la frecuencia de rotación. Si aumentamos la frecuencia de rotación, manteniendo constante la composición de la mezcla y el ángulo, entonces podrá observarse un desarrollo cada vez más tardío del proceso de combustión por ciclo. Con el correspondiente aumento del ángulo puede conseguirse que las líneas de crecimiento de la presión en la fase principal de combustión para diversos valores de n prácticamente coincidirán. Al elevar la frecuencia de rotación se incrementa un tanto la duración de la fase de combustión residual, pero cierta disminución de la efectividad del desprendimiento de calor vinculada con esto se compensa por la disminución de la transferencia de calor a las paredes, debido a la reducción del tiempo que los gases con elevadas temperaturas se encuentran en el cilindro.

Forma de la cámara de combustión

La turbulencia de la carga de trabajo en el cilindro, suscitada por el ingreso de la mezcla a través de las secciones de paso relativamente estrechas en los órganos de la distribución de los gases



(válvulas, conductos de admisión), puede ser adicionalmente reforzada gracias al traspaso de la mezcla desde el cilindro a la cámara de combustión al final de la carrera de compresión. Esto se logra proporcionando a las cámaras de combustión la forma más adecuada, para la cual en cierta parte de ella se forman huecos relativamente angostos entre la superficie inferior de la culata y la cara del pistón, que se denominan expulsos. Los expulsos se disponen de tal manera que permitan crear turbulencia adicional a la carga en aquellas zonas hasta las cuales el frente de llama llega desde las bujías en el último turno. Con esto se consigue la aceleración de la combustión residual. La bujía se coloca de tal manera que no origine demasiada turbulencia cerca de ella y, al mismo tiempo, que se garantice buen barrido respecto a los gases residuales en la zona de la bujía, dirigiendo hacia ella parte del flujo de la mezcla que entra a través de la válvula de admisión. Cuanto más cerca del centro de la cámara de combustión se instale la bujía, tanto más corto será el camino recorrido por el frente de llama hacia los puntos más alejados. Al colocar la bujía en la parte central se obtiene la mayor superficie del frente de llama, en consecuencia, la velocidad de desprendimiento del calor y, por lo tanto, la velocidad de crecimiento de la presión resultan más altas que cuando la bujía se sitúa al costado. Es indispensable, sin embargo, considerar que esto se refiere solamente a las cámaras de combustión que tienen forma simétrica. La creación de impulsos puede influir más sobre la velocidad de combustión que la disposición de la bujía.

Sin embargo, siendo la superficie de expulsos grande, la parte relativa de la mezcla no quemada que se enfría intensamente y está encerrada en angostas ranuras entre la culata y la cara del pistón, resulta ser bastante considerable, lo que puede conducir a una notable disminución del coeficiente activo de desprendimiento de calor en el punto P_{max} y por último a la disminución del trabajo útil del ciclo. Es por esta razón que la superficie de los expulsos generalmente no sobrepasa el 30-40% de la superficie del pistón.



2.6. Principales Alteraciones de la Combustión Normal

De acuerdo al análisis realizado por (Jovaj, 1982, págs. 138-141), se indica:

Detonación

Externamente la detonación se releva durante el funcionamiento del motor a grandes cargas en la aparición del golpeteo metálico estridente, que es el resultado de repercusiones periódicas múltiples sobre las paredes de la cámara de combustión de ondas de choque que se forman en los gases. Al suceder esto, al final de la combustión se registran vibraciones de la presión en forma de una serie de agudos picos que va gradualmente amortiguándose. La frecuencia de estas vibraciones de la presión es igual a la frecuencia principal de golpeteo audible. Ella depende de las velocidades de propagación de las ondas de choque y del camino recorrido entre las reflexiones consecutivas desde las paredes, que está determinada por las dimensiones del cilindro (principalmente por su diámetro). La detonación se produce por el autoencendido de la carga de trabajo más alejada de la bujía, hasta la cual el frente de llama llega desde la misma en último turno.

Autoencendido prematuro

El encendido anticipado es la anomalía de la combustión más peligrosa en los motores de encendido por chispa, ya que origina el incremento muy brusco del traspaso de calor a las paredes.

2.7. Gas Natural

Hoy en día el gas natural representa la alternativa energética que está cobrando cada vez más importancia a nivel mundial debido a sus beneficios ambientales, por ser el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización y sobre todo por sus beneficios económicos, ya que genera un ahorro significativo como lo demuestran las diferentes industrias que lo vienen utilizando.



2.7.1. Definición

Es una mezcla de hidrocarburos ligeros formados por átomos de carbono e hidrógeno, que se encuentra en el subsuelo en estado gaseoso, siendo su principal componente el metano.

2.7.2. Clasificación

Gas asociado: Es aquel que se encuentra en contacto y/o disuelto en el petróleo del yacimiento. Este gas tiene que ser sometido al proceso de separación gas - petróleo, para poder ser tratado y utilizado. Más del 90% de las reservas de gas natural es de gas asociado.

Gas no asociado: Yacimiento que contienen únicamente gas natural, a las condiciones de presión y temperatura originales.

2.7.3. Composición

La composición del gas natural no es uniforme, ya que varía de un yacimiento a otro. Su principal componente es el metano (CH_4), una molécula sencilla formada por 1 átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno. Contiene también otros hidrocarburos ligeros como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) o pentano (C_5H_{12}) en mucha menor proporción. Las principales impurezas que puede contener la mezcla son nitrógeno, dióxido de carbono, gas sulfhídrico, entre otros.

2.7.4. Propiedades

Propiedades físicas

De acuerdo a lo indicado por (Baquero Aguas & Avila Jaime, 2008, págs. 27-29), se tiene:

Estado: Se encontrará en estado gaseoso a cualquier temperatura, por encima de -126 C° .

Olor, color y sabor: En su estado puro, tal como fluye del yacimiento, el gas natural no tiene color, sabor, ni olor. Sólo por razones de seguridad y para detectar casos de fuga, se le agrega un odorante llamado etil mercaptano.



Gravedad específica: La gravedad específica se define como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire seco, tomados a la misma presión y temperatura. Si se toma como referencia la densidad del aire con un valor igual a uno (1), se tendría que la gravedad específica es de 0.60 para el gas natural.

Toxicidad: El gas natural no contiene ningún componente tóxico, por lo tanto no representa riesgo para la salud, en caso de ser respirado accidentalmente.

Temperatura calorífica: La temperatura calorífica del gas natural depende de su volumen y de la presión a la cual está siendo sometido el gas.

Densidad: Es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de sustancia. El gas natural presenta una densidad de 0,68 kg/m³. (Lira Cacho, 2011, pág. 26)

Temperatura de ebullición: Es la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión que rodea al líquido y el líquido se transforma en vapor. La temperatura de ebullición del gas natural es -162 °C. (Lira Cacho, 2011, pág. 26)

Temperatura de autoencendido: Es la temperatura mínima, a presión de una atmósfera, a la que un combustible en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de calor exterior. El gas natural presenta una temperatura de ebullición de 650 – 700 °C. (Lira Cacho, 2011, pág. 27)

Propiedades químicas

De acuerdo a lo indicado por (Baquero Aguas & Avila Jaime, 2008, págs. 31-34), se tiene:

Relación aire/combustible (a/c): Esta relación, define la cantidad de aire y de combustible necesarios para lograr una combustión. Para el caso de gas natural, la relación estequiométrica se indica en volumen; en cambio para la gasolina se indica en relación de peso o de masa.



El valor de la relación estequiométrica para el gas natural en masa está comprendida en 16,8 – 17,4 y en volumen en 9,6 – 10,2. (Lira Cacho, 2011, pág. 26)

Mezcla en combustión: La mezcla rica es la que se quema en una manera adecuada en el motor, la mezcla pobre no explota y se pierde y la mezcla flamable es la mezcla que se necesita para el proceso de ignición de la combustión.

Velocidad de llama o encendido: Es la velocidad con que la mezcla a/c se va quemando en la cámara de combustión desde el momento en que se produce la chispa hasta que la mezcla arde totalmente. El gas natural tiene una velocidad de llama de 0,29 m/s.

Octanaje: Es el número usado para describir la calidad antidetonante de los combustibles comerciales. El GNV tiene un octanaje de aproximadamente de 115 – 130 (Lira Cacho, 2011, pág. 27); por su parte nuestra gasolina va de 85 a 95 octanos y el GLP tiene 110.

Rango de inflamabilidad: Es el límite comprendido entre el mínimo y el máximo porcentaje de un gas en una mezcla aire/combustible, dentro del cual esta mezcla puede quemar o explotar. Para el gas natural se tiene un 4% como límite explosivo inferior, un 15% para el límite explosivo superior (estos valores son promedios ya que dependiendo de la composición los mismos varían ligeramente).

Poder calorífico: Es la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El gas natural presenta un poder calorífico de 33,3 – 34,1 MJ/m³ o 48,9 – 50,1 MJ/kg. (Lira Cacho, 2011, pág. 26)

2.7.5. Motores encendidos por chispa a gas natural

Dedicados, mono-valentes o monocombustibles



Estos motores son para vehículos que operan solamente con gas natural como su fuente de energía. Algunos de estos motores, a veces son acondicionados con un pequeño cilindro de gasolina de reserva para ser utilizado en situaciones de emergencia en las que al vehículo se le agote el gas.

Bi-combustible

Son los sistemas en los cuales los vehículos pueden operar con gasolina (o algún otro combustible) o gas natural alternadamente, sin necesidad de detener el motor. Los vehículos bi-combustible son el resultado de una conversión, la mayoría de estos vehículos utiliza la gasolina para encender el motor y una vez encendido, utilizan el sistema de gas.

Sistema dual

Denominado también dual-fuel, es el conjunto de elementos (que constituyen un equipo completo de conversión) que hacen posible que el vehículo pueda operarse usando combustible líquido (diésel generalmente) y gas natural, simultáneamente.

Sistema tri-combustible

Este sistema es una tecnología nueva que se encuentra en proceso de desarrollo. Básicamente, este sistema combina el llamado “flex-combustible” y gas natural. El “flex-combustible” es un sistema que utiliza como combustibles a la gasolina y etanol por separado o juntos. Un vehículo con este tipo de sistema puede operar con gasolina, etanol o gas natural. Esta clase de sistema, es usado en países como Brasil en donde el etanol es utilizado como una fuente energía principalmente para transporte.

2.7.6. Tecnología para la conversión

Kit de conversión por generación



El Kit de Conversión integra todos los componentes necesarios para la correcta conversión de un vehículo con motor de ciclo OTTO para gas natural. Los vehículos que son convertidos a GNV son bastante útiles y su mantenimiento es económico, debido a que el gas natural comprimido se consigue a un precio menor que la natfa. Aunque la conversión puede ser algo costosa, si se hace un balance, en el futuro se ahorrará mucho dinero en combustible. El desarrollo tecnológico de los sistemas duales fue logrado a través de los años mayormente por la industria italiana. Cada auto cuenta con características que definen el tipo de equipo adecuado para su respectiva conversión.

Se tiene las siguientes generaciones de conversión en los talleres automotrices de Perú para GNV:

3ra generación: Es lo equivalente a un carburado, es decir, aunque se pusiera en un motor inyectado con emuladores, la entrega de gas sería siempre a lazo abierto, regulado a manopla. Tanto para un carburado o para inyección, a la hora de andar a gas, sería lo mismo.

Con esta clase se inició las conversiones a gas natural en el Perú y se sustituyeron los combustibles líquidos, en el proyecto se utilizó un kit de 3era generación para la adaptación del motor.

Componentes

- Cilindro de GNV.
- Válvula de cilindro.
- Manómetro.
- Tubería de alta.
- Reductor de presión (1º Etapa, 2º Etapa y 3º Etapa) con electroválvula.
- Manguera de baja.
- Mezclador.



- Regulador de caudal.
- Llave conmutadora.

5ta generación: Es el sistema de mayor avance tecnológico y su funcionamiento es similar al del sistema de inyección secuencial de gasolina del vehículo a convertir. El regulador entrega gas a alta presión y se inyecta a cada cilindro en forma secuencial, tal como ocurre con la gasolina. El funcionamiento es controlado por la computadora del vehículo que generan las señales de inyección y por una computadora propia del equipo de gas que las interpreta para comandar la inyección a gas. De este modo el funcionamiento del vehículo es igual en gas que en gasolina.

La tendencia es la aplicación de esta tecnología en modelos de vehículos a partir del 2008 e incluso de algunos modelos anteriores, que tienen ya un avanzado diseño de electrónica de gran rendimiento. El riel de inyectores de gas es lo que hace la diferencia entre los de 3era y 5ta generación, estos dosifican de manera secuencial el gas.

Componentes

- Regulador
- Central electrónica
- Cables de conexión
- Sensor de presión absoluta
- Sensor de temperatura
- Rampa de inyección
- Filtro de gas
- Manómetro
- Llave indicador de conversión
- Manguera de agua



- Manguera de gas
- Tubería de alta
- Válvula de carga interna

2.7.7. Particularidades del funcionamiento del motor

Existen ciertos aspectos que presentan los motores operando con gas natural que deben ser tomados en cuenta para tener ciertas precauciones al momento de realizar las conversiones. Estos son:

La ignición

Se debe partir del hecho de que el gas natural necesita de una mayor temperatura que la gasolina para iniciar la combustión debido a su alto octanaje. La mezcla aire/gas natural es más aislante eléctricamente que la mezcla aire/gasolina; por este motivo, es necesario una mayor tensión de encendido entre los electrodos de las bujías para conseguir que se produzca la chispa. Al ser más aislante el medio, se incrementa la tensión de encendido y, consecuentemente, la corriente de mantenimiento. La corriente de mantenimiento es “aquella que hace posible que la corriente circule entre los electrodos de las bujías luego de producida la ruptura”; esto perjudica el tiempo de quemado, dado que la tensión de encendido siempre debe ser mayor cuando el motor funciona a gas natural. (López Rojas, 2008, pág. 30)

El avance

Debido a que la combustión del gas natural es más lenta que la combustión realizada con gasolina, es necesario adelantar el avance de la chispa; para, de esta manera, armonizar el momento de la presión en el ciclo de trabajo con el de la gasolina. (López Rojas, 2008, págs. 30-31)

Las bujías



Como se conoce, la distancia entre los electrodos aumenta con el uso de la bujía. El resultado es que la tensión de ionización se vuelve más elevada. Se recomienda, por tanto, mantener el tipo de bujías recomendadas por el fabricante, pues de lo contrario pueden aparecer problemas en el arranque. (López Rojas, 2008, pág. 31)

Fenómeno de la detonación o del picado

En un motor operando con gas, la combustión no se presenta inmediatamente en toda la mezcla aire/gas, como en un motor diesel, por ejemplo, en el que todas las gotas de combustible encienden debido a la presión y la temperatura de la cámara de combustión. La combustión de la mezcla aire/gas empieza por una chispa, y la llama toma un cierto tiempo para cruzar la cámara de combustión, encendiendo la mezcla, y aumentando la presión en la parte no alcanzada por el frente de llama. Durante el fenómeno de detonación, una parte de la mezcla ya quemó, y una parte espera ser quemada. La parte no quemada, llamada “gas muerto”, es calentada por la compresión debida a la expansión de la parte de la mezcla que se quema, y por las radiaciones de calor del propio frente de llama. Si la temperatura y la presión exceden algunos valores críticos, la parte no quemada se enciende espontáneamente antes de que el frente de llama la alcance. Esta pre-ignición provoca ondas de presiones elevadas, que rebotan sobre las paredes, y dando el ruido característico de la detonación, golpeteo o picado. Este fenómeno trae consigo un rendimiento malo del motor, una pérdida de potencia y dificultades térmicas y mecánicas anormales y peligrosas para el mantenimiento del motor.

Existen diversos factores que influyen en la detonación: las características del gas, la relación de compresión, la temperatura de admisión, el calado de la ignición, la carga (PME) y la relación aire/combustible. La detonación se caracteriza por "la indicación de octano". Mientras más elevado es, mejor es el combustible. (López Rojas, 2008, pág. 31)

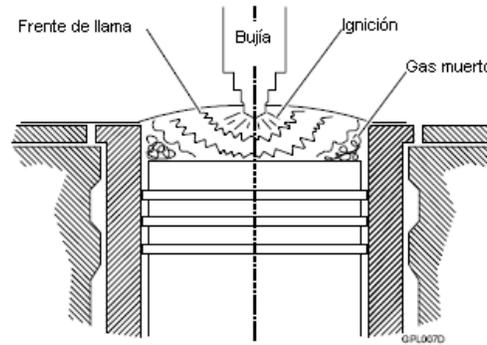


Figura 1. Representación del Fenómeno de Detonación. Sergio Angel Antonio López Rojas; Página 25; 2008.

2.8. Hidrogeno

A diferencia de los combustibles actuales, los cuales están condenados a terminarse, el hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos de todo el planeta, siendo así el elemento más básico y más fácil de encontrar en el universo. Se trata de un gas constituido por moléculas con dos átomos de hidrógeno.

En definitiva, este gas es el componente esencial del Sol y las estrellas. Aunque es preciso observar que aun tratándose del elemento más abundante de la naturaleza, raras veces se encuentra de manera libre debido a su facilidad de combinarse. Es por esta razón antes explicada que se deberá considerar al hidrógeno como un **Vector Energético** ya que no puede explotarse directamente como el petróleo, el carbón o el gas natural; sino que ha de generarse mediante otros componentes químicos, convirtiéndose en un portador de energía secundario.

2.8.1. Definición

Es un elemento químico cuyo símbolo es el "H" y número atómico 1. Con sólo un protón y un electrón es el elemento más común, generando el 75% de la masa del universo. Bajo condiciones ordinarias en la tierra, el hidrógeno existe como gas diatómico (H_2).

El dihidrogeno es una molécula diatómica homonuclear compuesta por dos átomos de hidrógeno; a temperatura ambiente es un gas inflamable, incoloro e inodoro.



2.8.2. Propiedades

Propiedades físicas

De acuerdo a lo indicado en la tesis "Estudio, Diseño y Construcción de un Generador de Hidrógeno por Electrólisis", se tiene:

- En condiciones normales, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y sin sabor.
- El hidrógeno dispone de una densidad en estado gaseoso (a 20 °C y 1 atm) de 0,08376 kg/m³; y una densidad líquida de 0,0708 kg/L.
- El volumen específico de gas de hidrógeno (a 20 °C y 1 atm) es de 11,9 m³/kg, mientras que el volumen específico del hidrógeno líquido (a -253 °C y 1 atm) es de 0,014m³/kg.
- Posee una gran rapidez de transición, cuando las moléculas se encuentran en fase gaseosa. Debido a esta propiedad, hay ausencia casi total, de hidrógeno en la atmósfera terrestre.
- Facilidad de efusión, así como también de difusión.
- Óptima conductividad calorífica.
- Punto de fusión de 14,025 K.
- Punto de ebullición de 20,268 K.
- Relación de expansión de 1:848. Significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido.

Propiedades químicas

De acuerdo a lo indicado por (Trigubó, Galante, Macchello, Franzi, & Baglioni, 2011), se tiene:

Relación aire/combustible (a/c): El valor de la relación estequiométrica para el hidrógeno molecular en masa es de 34,3 y en volumen de 2,37.



Velocidad de llama o encendido: La velocidad de llama laminar del Hidrógeno es de 170 cm/s.

Octanaje: El valor del octanaje para el hidrógeno es de 60 (RON).

Límite de inflamabilidad: Se tiene un 4% como límite explosivo inferior y un 75% para el límite explosivo superior.

Poder calorífico: El hidrógeno presenta un poder calorífico de 120 MJ/Kg.

2.8.3. Métodos de producción

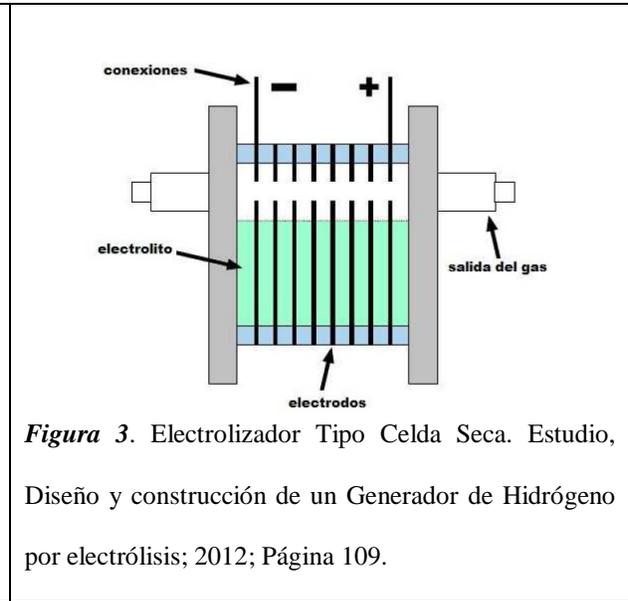
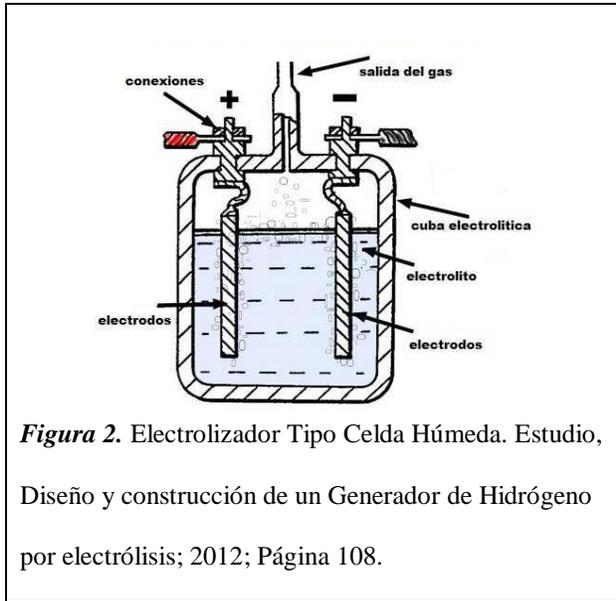
Reformado del gas natural: Síntesis de gas metano (CH_4), una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y una pequeña cantidad de dióxido de carbono, es creada por la reacción del gas natural con alta temperatura de vapor y una presión entre 3-25 bares usando un dispositivo de procesamiento llamado reformador. El proceso es endotérmico y requiere una catálisis en adición a la reacción de dióxido de carbono, en orden exitosamente produce hidrógeno.

Electrólisis: El paso de la corriente eléctrica a través del agua, produce una disociación entre el hidrógeno y el oxígeno, componentes de la molécula del agua. El hidrógeno se recoge en el cátodo (polo cargado negativamente) y el oxígeno en el ánodo. El proceso es mucho más caro que el reformado con vapor, pero produce hidrógeno de gran pureza. Este hidrógeno se utiliza en la industria electrónica, farmacéutica o alimentaria.

Para realizar la electrólisis necesitamos una celda donde se pueda producir. Existen dos tipos de celda, celda húmeda (Wet cell) y celda seca (Dry cell). La celda seca, es un electrolizador, es decir, es un dispositivo utilizado para generar hidrógeno y oxígeno mediante el principio de electrólisis del agua. Este contiene el electrolito dentro de sí. A diferencia de la celda húmeda, que también es un electrolizador, es una cuba electrolítica y contiene tanto la solución como el electrodo múltiple dentro de sí. La principal diferencia es que la Celda Seca puede soportar una mayor cantidad de corriente eléctrica que se transforma en calor pero que es disipado por las placas



externas del electrodo al medio ambiente. Por el contrario, la celda húmeda, por su diseño no posee una capacidad de disipación de calor tan efectiva, ya que el calor generado por los electrodos es absorbido por el electrolito. En este caso, si aumentamos la corriente eléctrica, también aumentara la temperatura del electrolito, convirtiéndose en vapor. Esto es un efecto perjudicial, ya que el gas resultante sería una mezcla de hidrógeno, oxígeno y vapor de agua.



Reformado con vapor: Con este procedimiento el hidrógeno se obtiene a partir de hidrocarburos, fundamentalmente del gas natural. El principal componente del gas natural es metano y la reacción consiste básicamente en separar el carbono del hidrógeno. El proceso tiene lugar en dos etapas: En la fase inicial, el gas natural se convierte en hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La segunda etapa consiste en producir hidrógeno adicional y dióxido de carbono a partir del monóxido de carbono producido durante la primera etapa. El monóxido de carbono es tratado con una corriente de vapor a alta temperatura produciéndose hidrógeno y dióxido de carbono. La mayoría del hidrógeno empleado por la industria petroquímica se genera de esta manera.



Oxidación parcial de combustibles fósiles con defecto de oxígeno: Se obtiene una mezcla de hidrógeno que posteriormente se purifica. Las cantidades de oxígeno y vapor de agua son controlados para que la gasificación continúe sin necesidad de aporte de energía.

Fotoelectrolisis: Este procedimiento aprovecha la radiación solar para generar la corriente eléctrica capaz de producir la disociación del agua y en definitiva la producción de hidrógeno.

Biomasa: Utilizando la biomasa como fuente de producción de hidrógeno, este se puede producir por dos procedimientos:

- **Gasificación de biomasa:** Se trata de someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700 y 1200 °C. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.
- **Pirolisis:** Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 °C. Se obtiene carbón vegetal y gas mezcla de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.

Producción fotobiológica: La cianobacteria y las algas verdes pueden producir hidrógeno, utilizando únicamente luz solar, agua e hidrogenasa como una enzima. Actualmente, esta tecnología está en periodo de investigación y desarrollo con eficiencias de conversión estimadas superiores al 24%. Se han identificado más de 400 variedades de plantas primitivas candidatas para producir hidrógeno.

2.8.4. Diferencia entre H₂, HHO y MHHO

HHO

- No puede ser usado como combustible único, sólo mezclado, hasta 50%, con gasolina, diésel, metano, GLP, para mejorar el kilometraje del 20-60%.
- No puede ser comprimido sobre 2 bares, sino explota.



- No puede ser almacenado en botellas.
- Una fuga significativa de hidrógeno es observada por los selladores regulares.
- No puede ser licuado, el oxígeno se cristaliza.
- Extremadamente inflamable, puede ser encendido por una pequeña chispa.
- Muy baja temperatura de flama, solo 140 °C.
- Llama de gas ionizada (conductora eléctrica) con propiedades de plasma.

MHHO, combustible ideal

- Puede ser usado como un combustible único limpio y barato para motores de combustión interna, turbinas de gas, motores de avión, motores de cohetes y mezclados (20-30%) con hidrógeno puro, o gases de hidrocarburo.
- Puede comprimirse a más de 200 bares y almacenarse de forma segura en botellas por años.
- Puede ser licuado a -178 °C y un bar (cerca de la temperatura del GNL) y almacenado en botellas de GNL.
- No es inflamable, no puede ser encendido por una chispa en condiciones normales, sólo bajo presión y calor.
- Muy baja temperatura de flama: sólo -140 °C.
- Llama de gas ionizada (conductora de electricidad), con propiedades de plasma.

Hidrógeno puro

- Puede usarse como combustible único barato y limpio para motores de combustión interna, Celdas de combustible, turbinas de gas y motores de cohetes.
- Pueden ser comprimidos sobre los 200 bares y almacenados y especialmente aislados en botellas por años.



- Puede ser licuado a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un bar, muy baja temperatura, muy difícil y costoso de lograr.
- Extremadamente inflamable.
- Alta temperatura propia de llama: $2100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Llama de gas no ionizada (no conductora de la electricidad), sin propiedades de plasma.
- Se puede utilizar como combustible en las Celdas de Combustible de Hidrógeno para la generación de energía a bordo en los vehículos eléctricos.
- Puede utilizarse como materia prima para la producción de combustibles hidrocarbonados, polímeros, etc.

2.8.5. Motor encendido por chispa a hidrógeno

Bujías: Las bujías tienen que ser de tipo frío para evitar el enfriamiento rápido.

Anillos de pistones: Se tiene que desplazar el anillo superior ligeramente hacia abajo para fortalecer el pistón frente a la menor distancia de enfriamiento.

Sistema de ignición: Se modifica para que no arda en el ciclo de escape.

Aceite: Se necesita usar aceite sintético para poder evitar la pirolisis, puntos calientes y la pre—ignición. Se necesita además un separador de aceite el cual ayude a la ventilación del cárter.

Grados a los que se aplica la chispa: Normalmente a los motores a gasolina se le aplica la chispa entre $8 - 9^{\circ}$ antes del PMS. En un motor de combustión que use hidrógeno se tendrá que aplicar la chispa justo en el PMS.

Revestimiento del sellado de las válvulas: Se tiene que evitar la entrada de aceite en la cámara de combustión.



Tolerancia de los pistones: Se recomienda que los pistones sean del tipo “Faldilla combada” de una aleación hiper-eutéctica y el pistón visto de planta debe de ser elíptico en vez de circular para que se adapte de mejor manera a los movimientos.

2.8.6. Mezclas de combustible

Mezcla de hidrógeno y metano

- Se concluye que el parámetro λ es el que más influye en el comportamiento del motor (hace variar mucho la temperatura de combustión).
- A mayor contenido de metano la cantidad de CO y de HC aumenta.
- A mayor velocidad de funcionamiento del motor se reducen las emisiones de CO y HC pero aumentan las concentraciones de NO_x.
- A mayor LAMBDA empeora el funcionamiento del motor pero se reduce las concentraciones de NO_x.
- Si retrasamos el encendido del motor, a mayor porcentaje de CH₄ se reducen las concentraciones de NO_x.

Mezcla de hidrógeno y gas natural

- A mayor cantidad de hidrógeno aumenta la presión máxima en el cilindro y aumenta la potencia.
- A mayor cantidad de hidrógeno disminuye las emisiones de CO₂

2.9. Problemática de los Motores de Combustión Interna

El cambio climático que sufre nuestro planeta es el principal desafío en pleno siglo XXI. El transporte de personas hoy en día es la principal razón de consumo de combustibles fósiles en el mundo. Los motores de combustión interna de los vehículos emiten varios tipos de gases y partículas que contaminan el medio ambiente, los productos que se emiten en mayor cantidad son:



óxidos nitrosos (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), compuestos orgánicos volátiles y también macropartículas.

2.9.1. Normativa EURO

Una norma europea sobre emisiones contaminantes es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se definen en una serie de directivas de la Unión Europea con implantación progresiva que son cada vez más restrictivas.

Actualmente, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), Hidrocarburos no quemados (HC), Monóxido de carbono (CO) y partículas están reguladas para la mayoría de los tipos de vehículos, incluyendo automóviles, camiones, trenes, tractores y máquinas similares, barcas, pero excluyendo los barcos de navegación marítima y los aviones. Para cada tipo de vehículo se aplican normas diferentes. El cumplimiento se determina controlando el funcionamiento del motor en un ciclo de ensayos normalizado. Los vehículos nuevos no conformes tienen prohibida su venta en la Unión Europea, pero las normas nuevas no son aplicables a los vehículos que ya están en circulación. En estas normas no se obliga el uso de una tecnología en concreto para limitar las emisiones de contaminantes, aunque se consideran las técnicas disponibles a la hora de establecer las normas.

Actualmente, desde 2014, la norma que se aplica es la EURO 6 en vehículos pesados y la EURO VI en vehículos ligeros.

La evolución de los números se da porque los límites de emisiones contaminantes se hacen más severas, aprovechando el desarrollo de nuevas tecnologías que favorecen la disminución de estos contaminantes (filtros de partículas, catalizadores, catalizadores de óxidos de nitrógeno).



2.9.2. Normativa sobre las emisiones en el Perú

Con la entrada en vigencia del Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, la adopción de la norma de emisiones vehiculares Euro IV y equivalentes es una realidad desde el 1 de abril del 2018, reemplazando a la tecnología EURO III vigente desde el año 2007 para vehículos gasolineros y 2015 para vehículos diesel, cabe recordar que la adopción de esta norma fue postergada en 2 oportunidades al no contar con condiciones adecuadas para su aplicación.

Asimismo, se estableció la prohibición de comercialización y uso de gasolinas y gasoholes de alto octanaje (RON 95/97/98) de más de 50 ppm de contenido de azufre a nivel nacional. Estas medidas fueron confirmadas en setiembre del 2017 mediante el Decreto Supremo N° 025-2017-EM. Asimismo la Euro IV permite un máximo de 30 ppm (partes por millón) de azufre.

Estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles

En el Perú, la calidad de aire se regula mediante los estándares de calidad ambiental (ECA) aprobada por Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, y las emisiones, mediante el Reglamento de Inspecciones Técnicas Vehiculares, aprobada por Decreto Supremo N° 047-2001-MTC modificada por la Resolución Ministerial N° 232-2012-MINAM que establece los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial.

2.9.3. Emisión de gases productos de la combustión

De acuerdo a lo indicado en la tesis de investigación (Caituiro Valenzuela & Florez Condori, 2013), los gases emitidos por un motor de combustión interna a gasolina, son principalmente, de dos tipos: inofensivos y contaminantes.



Los primeros están formados fundamentalmente, por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y gases contaminantes con el monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

Gases inofensivos

Son los que no alteran la naturaleza y son:

- ***Nitrógeno***: Es un gas inerte que se encuentra presente en el aire que se respira en una concentración del 79%., debido a las altas temperaturas existentes en el motor, el nitrógeno se oxida formando pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno, aunque sea un gas inerte a temperatura ambiente.
- ***Oxígeno***: Es uno de los elementos indispensables para la combustión y se encuentra presente en el aire en una concentración del 21%. Si su mezcla es demasiado rica o pobre, el oxígeno no podrá oxidar todos los enlaces de los hidrocarburos y será expulsado con el resto de los gases de escape.
- ***Vapor de agua***: Se produce como consecuencia de la combustión, mediante la oxidación del hidrógeno, y se libera junto con los gases de escape.

Gases contaminantes

Son los que alteran el medio ambiente entre estos se tiene:

- ***Dióxido de carbono***: Producido por la combustión del carbono con el oxígeno, debido al incremento desmesurado del dióxido de carbono en la atmósfera se está produciendo variaciones climáticas (efecto invernadero), por el aumento del parque industrial y automotriz resultando nocivo en grandes concentraciones para los seres vivos. Se estima que se produce CO₂ y llega a la atmósfera entre 35 a 40 millones de toneladas anuales.



- **Monóxido de carbono:** Se produce por la falta de oxígeno en la combustión y hace que no se quemé completamente, formándose monóxido y dióxido de carbono. En un vehículo, la aparición de mayores concentraciones de CO en el escape indica la existencia de una mezcla rica. En concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores al 0,3 % de CO en volumen resulta ser mortal.
- **Hidrocarburos:** Dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos, como por ejemplo el benceno que es tóxico y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel, ojos y conductos respiratorios.

Si la concentración es alta provocará depresiones, mareos, dolores de cabeza y náuseas, siendo causante del cáncer. Su presencia se debe a los componentes no quemados de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de Aldehídos y Fenoles.

La presencia simultánea de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y la degradación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias graves para la salud de los seres vivos.
- **Óxidos de nitrógeno:** Se producen por las altas temperaturas, el nitrógeno y los oxígenos moleculares pueden combinarse para formar óxido nítrico por ello se ha incrementado en gran medida la presencia de este gas en la atmósfera, y en el aire puede convertirse, en ácido nítrico produciendo así lluvia ácida. Además participan en la depleción de la capa de ozono.



Este gas no sólo irrita la mucosa sino que en combinación con los Hidrocarburos y la humedad del aire producen ácidos nitrosos, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida contaminando grandes extensiones desde lugar donde se produce.



CAPITULO III

CONSTRUCCION DEL EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO



CONSTRUCCION DEL EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO

3.1. Descripción

Debido a que en la ciudad del Cusco no se comercializa equipos generadores de hidrógeno, se optó por la construcción de uno del tipo celda seca (dry cell), cuyo funcionamiento se basa en el principio de la electrólisis.

La electrólisis no es el método más rentable de obtener hidrógeno, pero en nuestro caso, es la forma más fácil y efectiva, podemos obtener del alternador y la batería la energía eléctrica para producir la cantidad de hidrógeno necesaria. En nuestro caso se obtendrá HHO, debido a que el equipo no separa los átomos de hidrógeno y oxígeno, sino salen juntas para el posterior ingreso al motor.

El HHO obtenido lo utilizaremos junto con el gas natural para el funcionamiento del motor gasolinero, el cual se someterá a varias pruebas para determinar los productos de la combustión mediante el analizar de gases.

Para la construcción del generador de hidrógeno se tomó como referencia la tesis de (Holgado Secas, 2012). Se utilizó como electrolito la solución de agua destilada e hidróxido de sodio, por motivos de producción analizados en la tesis indicada.

El equipo de generación de hidrógeno cuenta con un electrodo positivo en el centro y dos electrodos negativos en los extremos, separados entre sí por tres electrodos neutros. El positivo y los negativos tienen la misma forma que los neutros, lo que los diferencia es que estos tienen una pestaña en la parte superior que servirá para poder hacer las conexiones eléctricas.



3.2. Componentes

Se utilizaron los siguientes componentes para la construcción del generador de hidrógeno.

Tabla 2. Componentes del Generador de Hidrogeno.

Componente	Descripción	Cantidad
Placa metacrilato	Dimensiones de 220x210 mm y 3 mm de espesor.	2
Electrodo de conexión	Acero inoxidable 304 de 190x201 mm y 1,5 mm de espesor.	3
Electrodo neutro	Acero inoxidable 304 de 190x195 mm y 1,5 mm de espesor.	6
Junta	Neopreno de 190x195 mm y 4 mm de espesor.	14
Niple	Diámetro de 1 pulgada de PVC.	2
Codo de 90°	Diámetro de 1 pulgada de polipropileno.	2
Bushing	De 1-3/4 pulgadas de polipropileno.	2
Reductor	De 1-1/2 pulgada de PVC.	2
Codo de 90°	Diámetro de 1/2 pulgada de CPVC.	4
Tee	Diámetro de 1/2 pulgada de CPVC.	1
Manguera de nivel	Diámetro de 1/2 pulgada y 1,5 m de longitud.	1
Manguera de nivel	Diámetro de 5/16 pulgadas y 1,5 m de longitud.	1
Perno	Acero galvanizado métrico 6 y 100 mm de longitud.	9
Arandela	Acero galvanizado métrico 6.	9
Tornillo	Acero galvanizado métrico 4 de 25 mm de longitud.	1
Tuerca	Acero galvanizado métrico 4.	1
Cinta teflón	Cinta teflón en rollo.	2
Tubo termo retráctil	Diámetro de 8 mm y 2 m de longitud.	1
Codo de 90°	Diámetro de 1/2 pulgada de PVC.	2
Tubo	Diámetro de 1/2 pulgada y 150 mm de longitud de PVC.	1
Adaptador UPR	Diámetro de 1/2 pulgada de PVC.	2
Válvula de paso	Diámetro de 1/2 pulgada de PVC.	1
Burbujeador	Capacidad de 1 litro.	1



Depósito de electrolito	Capacidad de 1 litro.	1
Platinas de acero	Ancho de 20 mm, 2500 mm de longitud y 3 mm de espesor.	1
Platinas de acero	Ancho de 30 mm, 1000 mm de longitud y 3 mm de espesor.	1
Abrazadera Metálica	Acero inoxidable 67-83 mm.	1
Cable automotriz N° 10, rojo y negro	Longitud de 2 m por cada color.	1
Pestañas eléctricas	Metálicas.	4
Silicona mega grey	Masa de 85 gramos	1

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Construcción

En este apartado describiremos el procedimiento para la construcción del generador de hidrógeno.

Trabajos previos

Se realizaron los siguientes trabajos para la construcción del generador de hidrógeno:

Las dos placas de metacrilato que funcionan como tapas del generador de hidrógeno, se cortaron con amoladora manual y posteriormente se hicieron los agujeros, de acuerdo a los planos N° 2.03 y 2.07.

Las tres placas de acero inoxidable 304 que funcionan como electrodos de conexión (positivo y negativo) y las seis placas de acero inoxidable 304 (electrodos neutros), se cortaron mediante corte laser CNC, tanto el contorno como los agujeros, de acuerdo los planos N° 2.05 y 2.06.

Los contornos de las catorce Juntas de neopreno, se cortaron con cúter y los agujeros se hicieron con el taladro de banco, de acuerdo al plano N° 2.04.

Se utilizó silicona mega grey para el pegado de los accesorios (maguera, niple, codo, bushing y reductor), luego se cortó pequeños pedazos de manguera de nivel para unirlos con el reductor y



codo de CPVC, y posteriores tramos hasta llegar al burbujeador. Después se realizó dos agujeros a la tapa del burbujeador de 1/2 y 5/16 pulgadas para la entrada y salida de HHO.

Se utilizó pegamento de PVC y cinta teflón para el pegado de los accesorios y válvula de paso para el tramo de entrada de electrolito. Posteriormente se realizó un agujero de 1/2 pulgada al envase del electrolito por la parte de abajo.

Para unir los accesorios y la llave de paso al envase de electrolito se utilizó silicona mega grey.

Se cortaron las platinas de acero con la amoladora manual de acuerdo a las dimensiones del generador de hidrógeno, las cuales se usaron como soporte del mismo.

Se cortaron las puntas del cable automotriz N° 10 con alicate para poder conectar las pestañas a los bornes de conexión de los electrodos positivo y negativo.

Los pernos se cubrieron con tubo termo retráctil y se calentó para que se adhiriera al perno, para crear así una capa aislante.

Se lijo las placas de acero inoxidable para conseguir una superficie rugosa, para la mejora del rendimiento de los electrodos en el proceso de la electrólisis. Cuando las placas estaban lijadas, se limpió con alcohol para eliminar todas las impurezas.

Montaje

Teniendo todo listo, se prosiguió a realizar el montaje:

Se empezó a poner electrodos y juntas, se dispuso los pernos para poder colocar los soportes y la tapa, entre la placa de metacrilato y el primer electrodo de conexión negativa se puso tres juntas para poder conseguir una separación de 12 mm, luego se alternó junta y placa neutra, hasta la siguiente placa de conexión positiva (disposición de 3 placas neutras). Se siguió poniendo juntas y placas neutras hasta la última placa de conexión negativa, con la misma disposición que la primera. Por último se puso los soportes, las arandelas y tuercas a cada perno, luego se ajustó



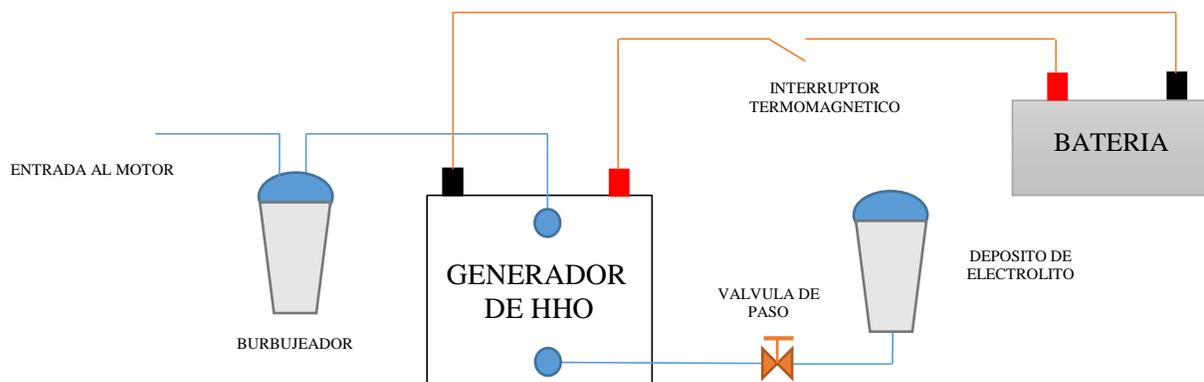
uniformemente con mucho cuidado, hasta que el generador de hidrógeno quedará como un bloque compacto y estanco.

Para unir el tramo de la entrada de electrolito y salida de HHO del equipo se utilizó silicona mega grey, luego se puso un perno para la conexión de los dos bornes negativos, la cual se unió con la pestaña del cable. De la misma manera se realizó para el borne positivo.

Se instaló un interruptor termo magnético para el corte de energía en el cable de alimentación para la producción de HHO.

3.4. Esquema del Sistema

A continuación se presenta al generador de HHO, mediante un esquema general.



Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa, hay dos partes claramente diferenciadas:

La primera, representada en color azul, es el circuito compuesto por accesorios, manguera, burbujeador, depósito de electrolito y llave de paso, elementos que permiten la producción de HHO.

La segunda, representada en color rojo, es el circuito eléctrico que permite aportar energía eléctrica al generador para que este pueda funcionar.



3.5. Reporte Fotográfico



Fotografía 1. Placa de Conexión.



Fotografía 2. Placa Neutra.



Fotografía 3. Junta de Neopreno.



Fotografía 4. Tapa del Lado de la Entrada de Electrolito.



Fotografía 5. Tapa del Lado de la Salida de HHO.



Fotografía 6. Perno y Arandela de 6 mm.



Fotografía 7. Tubo Termo Retráctil.



Fotografía 8. Cinta Teflón.



Fotografía 9. Silicona Mega Grey.



Fotografía 10. Abrazadera Metálica 67-83 mm.



Fotografía 11. Burbujeador.



Fotografía 12. Depósito de Electrolito.



Fotografía 13. Manguera de Nivel de 5/16 Pulgadas.



Fotografía 14. Manguera de Nivel de 1/2 pulgada.



Fotografía 15. Alcohol Medicinal.



Fotografía 16. Accesorios de CPVC.



Fotografía 17. Accesorios de PVC y Polipropileno.



Fotografía 18. Generador de Hidrogeno.



3.6. Cálculos

Para realizar los cálculos de la energía eléctrica necesaria, debemos conocer las leyes de Faraday de la electrólisis.

Primera ley de Faraday de la electrólisis: La masa de una sustancia alterada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo. La cantidad de electricidad se refiere a la cantidad de carga eléctrica, que en general se mide en coulombs.

Segunda ley de Faraday de la electrólisis: Para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica), la masa de un material elemental alterado en un electrodo, es directamente proporcional al peso equivalente del elemento. El peso equivalente de una sustancia es su masa molar dividida por un entero que depende de la reacción que tiene lugar en el material.

Forma Matemática

Las leyes de Faraday se pueden resumir en la forma moderna:

$$m = \frac{Q}{F} \times \frac{M}{z}$$

Donde:

m es la masa de la sustancia producida en el electrodo (en gramos).

Q es la carga eléctrica total que pasó por la solución (en coulombs).

F es la constante de Faraday.

M es la masa molar de la sustancia (en gramos por mol).

z es el número de valencia de la sustancia como ion en la solución (electrones por ion).

$F = qN_A = 96485,3365 \text{ C mol}^{-1}$ es la constante de Faraday.

M es la masa molar de la sustancia (en gramos por mol)

N_A es el número de Avogadro igual a $6,022 \times 10^{23}$ ion por mol.



La carga eléctrica se puede expresar como:

$$Q = Ixt$$

Donde:

I es la intensidad de corriente eléctrica (en amperios)

t es el tiempo transcurrido (en segundos)



CAPITULO IV

ADAPTACIÓN DEL KIT DE GNV Y EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO AL MOTOR



ADAPTACIÓN DEL KIT DE GNV Y EQUIPO GENERADOR DE HIDROGENO AL MOTOR

4.1. Construcción de la Estructura de Soporte del Motor

Se vio la necesidad de la construcción de una estructura metálica para el soporte del motor, para el fácil desplazamiento y sobre todo para la adaptación del kit de GNV y equipo generador de hidrógeno al motor.

Materiales y herramientas

Tabla 3. Materiales y Herramientas de Soporte Motor.

Material/Herramienta	Descripción	Cantidad
Perfil tubular cuadrado	Dimensiones de 40x40x2 mm de acero estructural y 6 m de largo.	2
Electrodos	Diámetro de 1/8 pulgada de Alma de níquel, AWS E6011 (1kg).	1
Rueda rígida	Diámetro de 4 pulgadas.	4
Disco de corte metal	Diámetro de 4 1/2 pulgadas de marca Dewalt.	1
Disco desbaste metal	Diámetro de 4 1/2 pulgadas de marca Dewalt.	1
Máquina de soldar portátil	Marca Safari.	1
Lijar para metal	Número 40.	4
Pintura spray	Marca Rust Oleum y color Negro.	3

Fuente: Elaboración propia.



Procedimiento

Se realizó los siguientes trabajos:

Se cortó el perfil tubular cuadrado de acuerdo a las dimensiones que se indica en el plano N° 1.01 con la amoladora manual.

Se prosiguió a soldar los perfiles cortados y las ruedas con electrodos del tipo punto azul con la ayuda de la máquina de soldar portátil. Luego se dio un mejor acabado a las uniones soldadas con la amoladora manual, utilizando el disco de desbaste. Por último se lijo la estructura de soporte del motor y se pintó de color negro.

Cabe resaltar que se utilizó los EPP de seguridad, correspondiente a cada trabajo.

4.2. Kit de Gas Natural Vehicular

Son todos los componentes que se utilizaron para que el motor funcione a gas natural. Se compró el kit de la Ciudad de Lima, debido a que en nuestra región el parque automotor solo utiliza gasohol y Diesel B5 S-50.

Se optó por la compra de un kit de GNV de tercera generación, tomando en cuenta las características técnicas del motor. El tanque de GNV de 65 litros vino cargado a 160 bares, con su respectiva válvula y cuna metálica. Se compró un relé para desactivar el inyector cuando el motor este en modo gas natural.

Componentes

Tabla 4. Componentes Kit de GNV de Tercera Generación.

Componente	Cantidad
Tanque de GNV	1
Válvula de Tanque	1
Tubería de alta presión	1
Manómetro	1



Conmutador	1
Reductor de tres etapas	1
Válvula de regulación de gas natural	1
Manguera de baja presión	1
Mezclador	1
Abrazadera de la tubería de alta	6
Accesorios de la tubería de alta	4
Abrazadera 16-27 mm	4
Abrazadera 8-16 mm	2
Perno de mezclador 3mm	1
Relé	1

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento

Para realizar las pruebas, se tuvo que adaptar el kit de GNV de tercera generación al motor de la siguiente manera:

Una vez recogido el kit de GNV, se prosiguió a la verificación de los componentes y el estado de los mismos, debido a que el kit fue enviado de la Ciudad de Lima.

El motor fue montado sobre la estructura metálica con la ayuda de una minigrúa, el cual se apoyó en tres puntos.

Se adaptó platinas a la estructura metálica para los apoyos y cuando el motor fue montado se aseguró mediante pernos.

La cuna del tanque de GNV fue soldada en la estructura metálica, luego se montó el tanque.

Teniendo en cuenta el recorrido de la tubería de alta presión en la estructura del motor, se cortó dos tramos, para la instalación de la línea de alta, del tanque al manómetro y del manómetro al reductor.



Se adiciono a la estructura metálica una platina para la sujeción del reductor, se le hizo un agujero en el medio de 8 mm y luego se soldó en la estructura con electrodos de punto azul

Para unir la válvula del cilindro con la tubería, la tubería con el manómetro, manómetro con el reductor, se utilizó cinta teflón para evitar fugas, luego la tubería de alta se instaló en la estructura de soporte con las abrazaderas de un solo lado.

La división mínima del manómetro fue modificada para cada dos bares (rango inicial cada 20 bares), todo ello para conseguir una referencia de consumo de GNV.

Se conectó dos mangueras de agua caliente al reductor, todo esto con la finalidad de que el gas natural no se condense debido a la reducción de presión.

La salida de gas de la tercera etapa (15 mm bar aproximadamente) se conectó al mezclador mediante una manguera de baja, el reductor con la manguera, la manguera con el regulador de gas y el regulador de gas con el mezclador. En las conexiones se utilizaron abrazaderas metálicas para evitar fugas.

El mezclador se fijó al tubo de admisión con un tornillo, ubicándose en la parte superior del motor.

Los cables eléctricos del conmutador se conectarán a la chapa de contacto, al relé, al manómetro y al cable del distribuidor del primer cilindro.

Detección de fugas

Se realizó la detección de fugas a la instalación de GNV, tomando en consideración la prueba de burbujeo contemplada en el D.S 054-93-EM de la siguiente manera:

Se abrió la válvula de tanque para que toda la línea este a presión, luego se pasó agua con detergente a las uniones de la instalación.

Se verifico que la instalación no presenta fuga alguna.



4.3. Generador de Hidrogeno

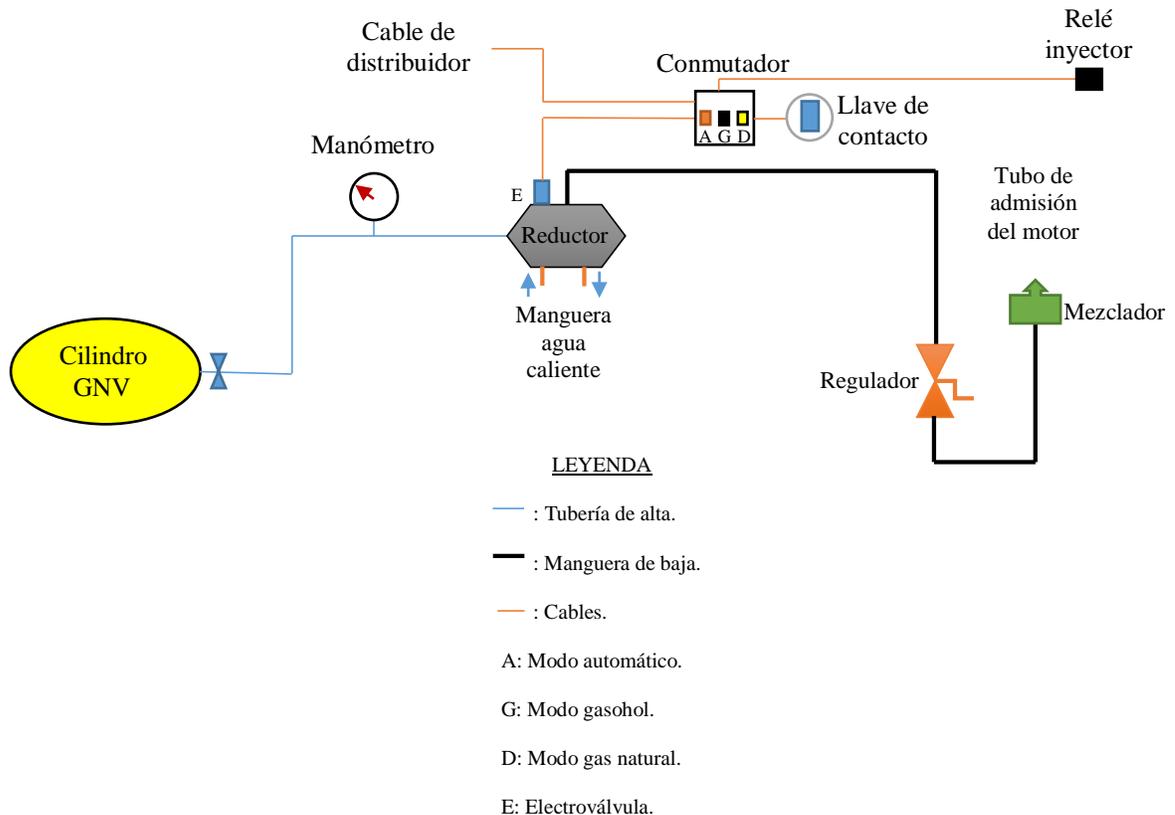
Teniendo el equipo generador de hidrógeno construido y la instalación del kit de GNV finalizado, se prosiguió al montaje en la estructura metálica, tomando en consideración las distancias para un adecuado ingreso de HHO al motor.

Procedimiento

Se realizaron los siguientes trabajos:

Se adicono a la estructura metálica tres platinas para el soporte del equipo generador de hidrógeno, tal como se puede observar en el plano N° 1.01. Se realizó un agujero de 8 mm a cada platina y posteriormente se soldó a la estructura. El generador de hidrogeno se aseguró mediante pernos.

Esquema de la instalación de kit de GNV de tercera generación



Fuente: Elaboración Propia.



4.4. Reporte Fotográfico



Fotografía 19. Estructura Metálica de Soporte del Motor.



Fotografía 20. Montaje del Motor sobre la Estructura Metálica.



Fotografía 21. Reductor Tartarini con su Electroválvula.



Fotografía 22. Mezclador.



Fotografía 23. Tubería de Alta Presión (200 Bares).



Fotografía 24. Manguera de Baja Presión con su Respectiva Abrazaderas.



Fotografía 25. Manómetro (0-400bares).



Fotografía 26. Perno del Mezclador.



Fotografía 27. Conmutador.



Fotografía 28. Tanque de GNV.



Fotografía 29. Válvula del Tanque de GNV.



Fotografía 30. Abrazadera de la Tubería de Alta Presión.



Fotografía 31. Accesorios de la Tubería de Alta Presión.



Fotografía 32. Relé.



Fotografía 33. Conexión del Cable de RPM al Cable del Distribuidor del Primer Cilindro.



Fotografía 34. Abrazadera para la Manguera de Baja Presión.



Fotografía 35. Manguera de Agua Caliente.



Fotografía 36. Abrazadera para la Manguera de Agua Caliente.



Fotografía 37. Prueba de Hermeticidad a la Instalación de GNV.



CAPITULO V
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 Pruebas

Las pruebas se realizaron en la ciudad del Cusco, en el Centro de Inspección Vehicular TUPAC AMARU, bajo las siguientes condiciones ambientales:

- Altura: 3399 msnm
- Temperaturas: 23,7 °C y 25 °C
- Presión ambiental: 69 kpa
- Humedad relativa: 52%

5.1.1. Productos de la combustión y consumos

Se determinaron los productos de la combustión y los consumos mediante el analizador de gases e instrumentos de medición que posee el Centro de Inspección Vehicular TUPAC AMARU.

Equipo



Fotografía 38. Analizador de Gases HGA 400 4GR.



Instrumentos de medición



Fotografía 39. Termómetro Infrarrojo.



Fotografía 40. Anemómetro Digital.



Fotografía 41. Tacómetro Digital.



Fotografía 42. Amperímetro.



Fotografía 43. Voltímetro Digital.



Fotografía 44. Multímetro Digital.



Fotografía 45. Manómetro (0-400 Bares).

Herramientas

- Llave N° 14
- Alicates
- Desarmador plano y estrella
- Llave allen N° 3

Equipos de seguridad

- Extintor Portátil de 12 Kg (20A: 80BC).
- Equipo de protección personal (zapatos de seguridad, guantes, lentes, mameluco y casco)
- Ambiente de trabajo ventilado
- Área mínima de trabajo 8 m².

Mediciones

- Monóxido de carbono CO (% vol).
- Hidrocarburos no quemados HC (ppm).
- Dióxidos de carbono CO₂ (% vol).
- Dioxígeno O₂ (% vol).
- Coeficiente de exceso de aire λ .



- Velocidad de rotación de la volante de inercia (RPM).
- Velocidad de ingreso de aire (m/s).
- Temperatura del electrolizador del gas y electrolito (°C).
- Intensidad de corriente continua en el electrolizador (A).
- Tensión de corriente continua en el electrolizador (V).
- Variación de presión de la línea de gas (bar)
- Tiempo de variación de presión (min).
- Tiempo de consumo de volumen de gasolina (min)

Procedimiento

Se verifico que todos los elementos estén en su lugar y en perfecto estado. Se puso agua al radiador y se tapó con su respectiva tapa de presurización.

- **Gasohol 90 plus**

Teniendo el tanque con combustible, se encendió el motor mediante la llave de contacto.

Se adelantó la chispa a 15° con la ayuda de la lámpara estroboscópica, para un mejor funcionamiento del motor a las condiciones ambientales de la ciudad de Cusco.

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (760,5 rpm), luego a 2007 rpm y por último a 2566 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire y los productos de la combustión. Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos, tal como se indica en la Resolución Ministerial N° 232-2012-MINAM.



Reporte fotográfico



Fotografía 46. Régimen de 760,5 rpm.



Fotografía 47. Productos de la Combustión a 760,5 rpm.



Fotografía 48. Régimen de 2007 rpm.



Fotografía 49. Productos de la Combustión a 2007 rpm.



Fotografía 50. Régimen de 2566 rpm.



Fotografía 51. Productos de la Combustión a 2566 rpm.



Fotografía 52. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 760,5 rpm.



Fotografía 53. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2007 rpm.



Fotografía 54. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2566 rpm.

- **GNV**

Una vez culminada con la prueba en gasohol 90 plus, se abrió la válvula de tanque y luego se pasó al modo gas natural con la ayuda del conmutador. EL Tanque de GNV se encontraba a 140 bares.

Se adelantó la chispa a 24° con la ayuda de la lámpara estroboscópica, para un mejor funcionamiento del motor a las condiciones ambientales de la ciudad de Cusco.

Se regulo manualmente el gas natural en la línea de baja presión mediante el regulador.

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (775,1 rpm), luego a 2049 rpm y por último a 2478 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los



productos de la combustión, la variación de presión del manómetro y el tiempo de variación. La variación de presión se pudo visualizar con la ayuda de una lupa.

Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante.

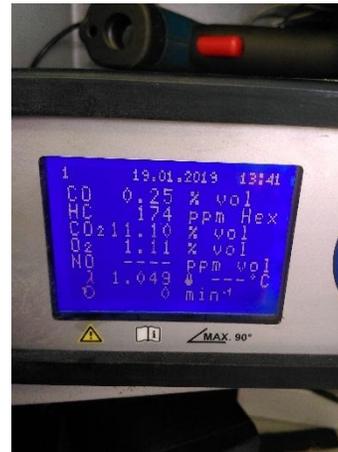
Se recomienda que el encendido del motor sea primero a gasohol para luego pasar al modo gas natural.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos, tal como se indica en la Resolución Ministerial N° 232-2012-MINAM.

Reporte fotográfico



Fotografía 55. Régimen de 775,1 rpm.



Fotografía 56. Productos de la Combustión a 775,1 rpm.



Fotografía 57. Régimen de 2049 rpm.



Fotografía 58. Productos de la Combustión a 2049 rpm.



Fotografía 59. Régimen de 2478 rpm.



Fotografía 60. Productos de la Combustión a 2478 rpm.



Fotografía 61. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 775,1 rpm.



Fotografía 62. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2049rpm.



Fotografía 63. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2478 rpm.



- **Mezcla 1**

Se disolvió 30 gramos (3% del solvente) de hidróxido de sodio (NaOH) sólido en 1000 gramos de agua destilada. La solución se introdujo mediante el depósito de electrolito al interior del electrolizador.

Se verificó las conexiones eléctricas del equipo generador de hidrógeno, luego se conectó la manguera de nivel al tubo de admisión del motor para el ingreso de HHO.

Se puso el motor en funcionamiento modo gas natural, luego se cerró el circuito eléctrico del electrolizador mediante el interruptor termo magnético para la producción de HHO con la batería del motor como fuente de alimentación.

Se mantuvo el caudal de gas natural de la anterior prueba (modo gas natural).

Se adelantó la chispa a 22° con la ayuda de la lámpara estroboscópica, para un mejor funcionamiento del motor a las condiciones ambientales de la ciudad de Cusco.

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (511,8 rpm), luego a 2041 rpm y por último a 2766 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los productos de la combustión, la variación de presión del manómetro y el tiempo de variación, la corriente y voltaje del electrolizador, la temperatura del gas HHO y electrolito dentro del electrolizador. Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante.

Se detuvo la producción de HHO mediante el interruptor termo magnético.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos.



Reporte fotográfico



Fotografía 64. Régimen de 511,8 rpm.



Fotografía 65. Productos de la Combustión a 511,8 rpm.



Fotografía 66. Régimen de 2041 rpm.



Fotografía 67. Productos de la Combustión a 2041 rpm.



Fotografía 68. Régimen de 2766 rpm.



Fotografía 69. Productos de la Combustión a 2766 rpm.



Fotografía 70. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 511,8 rpm.



Fotografía 71. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2041 rpm.



Fotografía 72. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2766 rpm.

- **Mezcla 2**

Se drenó el electrolito de la prueba anterior, luego se disolvió 40 gramos (4% del solvente) de hidróxido de sodio (NaOH) sólido en 1000 gramos de agua destilada. La solución se introdujo mediante el depósito de electrolito al interior del electrolizador.

Se verificó las conexiones eléctricas del equipo generador de hidrógeno, luego se conectó la manguera de nivel al tubo de admisión del motor para el ingreso de HHO.



Se puso el motor en funcionamiento modo gas natural, luego se cerró el circuito eléctrico del electrolizador mediante el interruptor termo magnético para la producción de HHO con la batería del motor como fuente de alimentación.

Se mantuvo el caudal de gas natural de la anterior prueba (modo gas natural).

Se adelantó la chispa a 22° con la ayuda de la lámpara estroboscópica, para un mejor funcionamiento del motor a las condiciones ambientales de la ciudad de Cusco.

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (638,1 rpm), luego a 2135 rpm y por último a 2960 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los productos de la combustión, la variación de presión del manómetro y el tiempo de variación, la corriente y voltaje del electrolizador, la temperatura del gas HHO y electrolito dentro del electrolizador. Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante.

Se detuvo la producción de HHO mediante el interruptor termo magnético.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos.

Reporte fotográfico



Fotografía 73. Régimen de 638,1 rpm.



Fotografía 74. Productos de la Combustión a 638,1 rpm.



Fotografía 75. Régimen de 2135 rpm.



Fotografía 76. Productos de la Combustión a 2135 rpm.



Fotografía 77. Régimen de 2960 rpm.



Fotografía 78. Productos de la Combustión a 2960 rpm.



Fotografía 79. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 638,1 rpm.



Fotografía 80. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2135 rpm.



Fotografía 81. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2960 rpm.

- **Mezcla 3**

Se drenó el electrolito de la prueba anterior, luego se disolvió 50 gramos (5% del solvente) de hidróxido de sodio (NaOH) sólido en 1000 gramos de agua destilada. La solución se introdujo mediante el depósito de electrolito al interior del electrolizador.

Se verificó las conexiones eléctricas del equipo generador de hidrógeno, luego se conectó la manguera de nivel al tubo de admisión del motor para el ingreso de HHO.

Se puso el motor en funcionamiento modo gas natural, luego se cerró el circuito eléctrico del electrolizador mediante el interruptor termo magnético para la producción de HHO con la batería del motor como fuente de alimentación.

Se mantuvo el caudal de gas natural de la anterior prueba (modo gas natural).

Se adelantó la chispa a 22° con la ayuda de la lámpara estroboscópica, para un mejor funcionamiento del motor a las condiciones ambientales de la ciudad de Cusco.

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (545,3 rpm), luego a 1959 rpm y por último a 2717 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los productos de la combustión, la variación de presión del manómetro y el tiempo de variación, la



corriente y voltaje del electrolizador, la temperatura del gas HHO y electrolito dentro del electrolizador. Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante.

Se detuvo la producción de HHO mediante el interruptor termo magnético.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos.

Reporte fotográfico



Fotografía 82. Régimen de 545,3 rpm.



Fotografía 83. Productos de la Combustión a 545,3 rpm.



Fotografía 84. Régimen de 1959 rpm.



Fotografía 85. Productos de la Combustión a 1959 rpm.



Fotografía 86. Régimen de 2717 rpm.



Fotografía 87. Productos de la Combustión a 2717 rpm.



Fotografía 88. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 545,3 rpm.



Fotografía 89. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 1959 rpm.



Fotografía 90. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2717 rpm.



- **Mezcla 4**

Teniendo el electrolito de la prueba anterior en el interior del electrolizador se continuó con la prueba. Se mantuvo el adelanto de chispa en 22°.

Se verificó las conexiones eléctricas del equipo generador de hidrógeno.

Se puso el motor en funcionamiento modo gas natural y se cerró el circuito eléctrico del electrolizador mediante el interruptor termo magnético para la generación de HHO con la batería del motor como fuente de alimentación.

En este caso se dio las mejores condiciones de funcionamiento del motor en ralentí regulando el ingreso de gas natural (se disminuyó el ingreso de gas natural).

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (561,3 rpm), luego a 2114 rpm y por último a 2760 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los productos de la combustión, la corriente y voltaje del electrolizador, la temperatura del gas HHO y electrolito dentro del electrolizador.

Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante. Se mantuvo el adelanto de chispa de la mezcla.

Se detuvo la producción de HHO mediante el interruptor termo magnético.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos.



Reporte fotográfico



Fotografía 91. Régimen de 561,3 rpm.



Fotografía 92. Productos de la Combustión a 561,3 rpm.



Fotografía 93. Régimen de 2114 rpm.



Fotografía 94. Productos de la Combustión a 2114 rpm.



Fotografía 95. Régimen de 2760 rpm.



Fotografía 96. Productos de la Combustión a 2760 rpm.



Fotografía 97. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 561,3 rpm.



Fotografía 98. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2114rpm.



Fotografía 99. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2760 rpm.

- **Mezcla 5**

Teniendo el electrolito de la prueba anterior en el interior del electrolizador se continuó con la prueba. Se mantuvo el adelanto de chispa en 22°.

Se verificó las conexiones eléctricas del equipo generador de hidrógeno.

Se puso el motor en funcionamiento modo gas natural y se cerró el circuito eléctrico del electrolizador mediante el interruptor termo magnético para la generación de HHO con la batería del motor como fuente de alimentación.



En este caso se dio las mejores condiciones de funcionamiento del motor en alta rpm regulando el ingreso de gas natural (se incrementó el ingreso de gas natural).

Se prosiguió con las pruebas a distintos regímenes, se comenzó con ralentí (953,8 rpm), luego a 2065 rpm y por último a 2659 rpm, donde se midió las RPM, la velocidad de ingreso de aire, los productos de la combustión, la corriente y voltaje del electrolizador, la temperatura del gas HHO y electrolito dentro del electrolizador. Las fotografías de las mediciones realizadas se muestran más adelante. Se mantuvo el adelanto de chispa de la mezcla.

Se detuvo la producción de HHO mediante el interruptor termo magnético.

Cada régimen de prueba se mantuvo por 30 segundos.

Reporte fotográfico



Fotografía 100. Régimen de 953,8 rpm.



Fotografía 101. Productos de la Combustión a 953,8 rpm.



Fotografía 102. Régimen de 2065 rpm.



Fotografía 103. Productos de la Combustión a 2065 rpm.



Fotografía 104. Régimen de 2659 rpm.



Fotografía 105. Productos de la Combustión a 2659 rpm.



Fotografía 106. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 953,8 rpm.



Fotografía 107. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2065 rpm.



Fotografía 108. Velocidad y Temperatura de Ingreso de Aire a 2659 rpm.



Resultados obtenidos

Tabla 5. Resultados de los Productos de la Combustión.

PARAMETROS	COMBUSTIBLE						
	G-90P	GNV	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4	MEZCLA 5
RPM	760,5	775,1	511,8	638,1	545,3	561,3	953,8
CO (% vol)	0,2	0,25	1,62	0,23	0,92	0,85	3,66
HC (ppm)	273	174	183	174	176	172	178
CO2 (% vol)	12,3	11,1	10,1	11,4	10,9	11	7,5
O2 (% vol)	3,76	1,11	1,08	0,9	0,69	0,66	3,45
Lambda (λ)	1,189	1,049	0,994	1,036	0,998	0,999	1,044
RPM	2007	2049	2041	2135	1959	2114	2065
CO (% vol)	1,57	0,19	0,18	0,12	0,17	0,15	0,15
HC (ppm)	223	1587	197	175	345	195	134
CO2 (% vol)	13,9	2,3	7	7,3	6,5	7,4	11,4
O2 (% vol)	0,32	15,89	8,23	8,67	9,18	7,83	0,75
Lambda (λ)	0,961	3,944	1,766	1,789	1,897	1,694	1,033
RPM	2566	2478	2766	2960	2717	2760	2659
CO (% vol)	1,44	0,21	0,33	0,15	0,16	0,14	0,19
HC (ppm)	279	1469	259	159	251	170	136
CO2 (% vol)	14	2,8	8,2	7,7	6,7	7,5	11,3
O2 (% vol)	0,31	15,4	5,69	7,83	9,2	7,94	0,71
Lambda (λ)	0,962	3,532	1,426	1,672	1,891	1,7	1,029

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Comportamiento de la potencia del motor en ralentí

Se utilizó un banco de focos para determinar el comportamiento del motor respecto a la potencia, para lo cual se adaptó un alternador de la marca Bosch al motor para las pruebas correspondientes.

Instrumentos de medición

- Voltímetro
- Tacómetro
- Amperímetro



Componentes eléctricos

Tabla 6. Componentes Eléctricos Banco de Focos.

Componente	Cantidad
Foco led Kobo H4 12v 100w	5
Socket conector H4 hembra	5
Interruptor ON OFF negro 2 pines	5
Cable N° 14	3
Cable N° 12	2
Resistencia de 1K ω	1

Fuente: Elaboración propia.

Materiales

Tabla 7. Materiales Banco de Focos.

Materiales	Cantidad
Cinta aislante 3M	2
Plancha de cartón prensado 1,5x1 m	1
Silicona 300 ml	1

Fuente: Elaboración propia.

Equipos de seguridad

- Extintor portátil de 12 kg (20A: 80BC)
- Equipo de protección personal (zapatos de seguridad, guantes, lentes, mameluco y casco)
- Ambiente de trabajo ventilado
- Área mínima de trabajo 8 m².

Mediciones

Intensidad de corriente continua (A).

Tensión de corriente continua (V).



Régimen de giro del motor (RPM).

Trabajos previos

Se realizó los siguientes trabajos, antes realizar las pruebas:

Se cortó una plancha de 0,5x0,5 m de cartón prensado y luego se hizo cinco agujeros para los focos led.

Se hizo cortes en el cartón prensado de acuerdo a la forma de los componentes eléctricos (interruptor, amperímetro y voltímetro), luego se empotro en la estructura de soporte del motor.

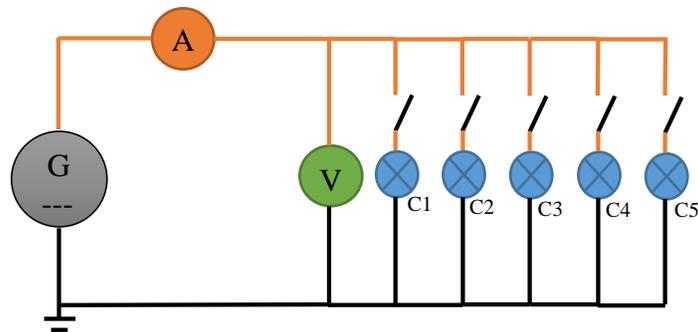
Se hizo la instalación eléctrica para los focos led con los cables N° 12 y 14, luego se aislaron con la cinta 3M.

Se pegaron los focos led, interruptor, amperímetro y voltímetro en el tablero de cartón prensado.

Se hizo la conexión del banco de focos led con el alternador.

Circuito eléctrico

El banco de focos presenta el siguiente circuito eléctrico:



LEYENDA

C1=C2=C3=C4=C5= Foco

A= Amperímetro

V= Voltímetro

G= Alternador

Fuente: Elaboración propia.



Procedimiento

Se prosiguió a realizar las pruebas, se comenzó con gasohol 90 plus y se terminó en mezcla 5

- **G-90P**

Encendido el motor en gasohol 90 plus, se puso en ralentí para medir la potencia.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **GNV**

Se pasó a modo GNV y se puso en ralentí para medir la potencia.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 1**

Estando en modo gas natural se comenzó a producir hidrógeno. Se puso 30 gramos de soda caustica (NaOH) en 1000 gramos de agua, para poder generar HHO.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 2**

En este caso se puso 40 gramos de soda caustica (NaOH) en 1000 gramos de agua, para poder generar HHO.



Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 3**

En este caso se puso 50 gramos de soda caustica (NaOH) en 1000 gramos de agua, para poder generar HHO.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 4**

Se mantuvo 5% de soluto respecto al solvente, luego se prosiguió a medir la potencia, dando las mejores condiciones en ralentí al motor.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 5**

Se mantuvo el 5% de soluto respecto al solvente, luego se prosiguió a medir la potencia, dando las mejores condiciones en régimen alto al motor. A esta condición no se encendió ningún foco led, debido a que se registró un régimen de giro bajo de 548,7 rpm.

- **Mezcla 4**

Adicionalmente se realizó otra prueba para esta mezcla, con la diferencia de que la batería solo alimentaba al generador de hidrógeno para la producción correspondiente.



Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

- **Mezcla 5**

Adicionalmente se realizó otra prueba para esta mezcla, con la diferencia de que la batería solo alimentaba al generador de hidrógeno para la producción correspondiente.

Se midió las RPM en ralentí con el tacómetro y luego se encendió uno por uno los focos led, hasta que el alternador llegue a sus RPM mínimas de trabajo. Posteriormente se midió la RPM en ralentí con carga (focos led).

Resultados obtenidos

Los datos se consignaron en el protocolo de pruebas para potencia, teniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 8. Variación de RPM y Voltaje del Sistema.

Régimen	Condición	Combustible	RPM Inicio	RPM Final	Voltaje Sistema (V)
Ralentí	Batería motor	G-90P	819,9	665,1	14,2
		GNV	833,1	561,1	14,2
		Mezcla 1	647,9	553,6	13,9
		Mezcla 2	645,3	555,7	14
		Mezcla 3	606	468,1	13,9
		Mezcla 4	596,7	530,9	13,8
		Mezcla 5	548,7	0	13,8
	Batería externa	Mezcla 4	843,6	558	14,2
		Mezcla 5	955	633,9	14,3

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 9. Resultados Obtenidos de Potencia Eléctrica en Ralentí.

Régimen	Condición	Combustible	Voltaje (V)	Corriente (A)	Focos Encendidos	Variación RPM	P.E Foco (W)	P.E Sistema (W)
Ralentí	Batería motor	G-90P	8,9	32	4	154,8	71,2	284,8
		GNV	8,8	25	3	272	73,3	220
		Mezcla 1	8,6	19	2	94,3	81,7	163,4
		Mezcla 2	9,9	17	2	89,6	84,2	168,3
		Mezcla 3	9,2	11	1	137,9	101	101,2
		Mezcla 4	11,8	8	1	65,8	94,4	94,4
		Mezcla 5	0	0	0	548,7	0	0
	Batería externa	Mezcla 4	9	28	3	285,6	84	252
		Mezcla 5	8,4	30	4	321,1	63	252

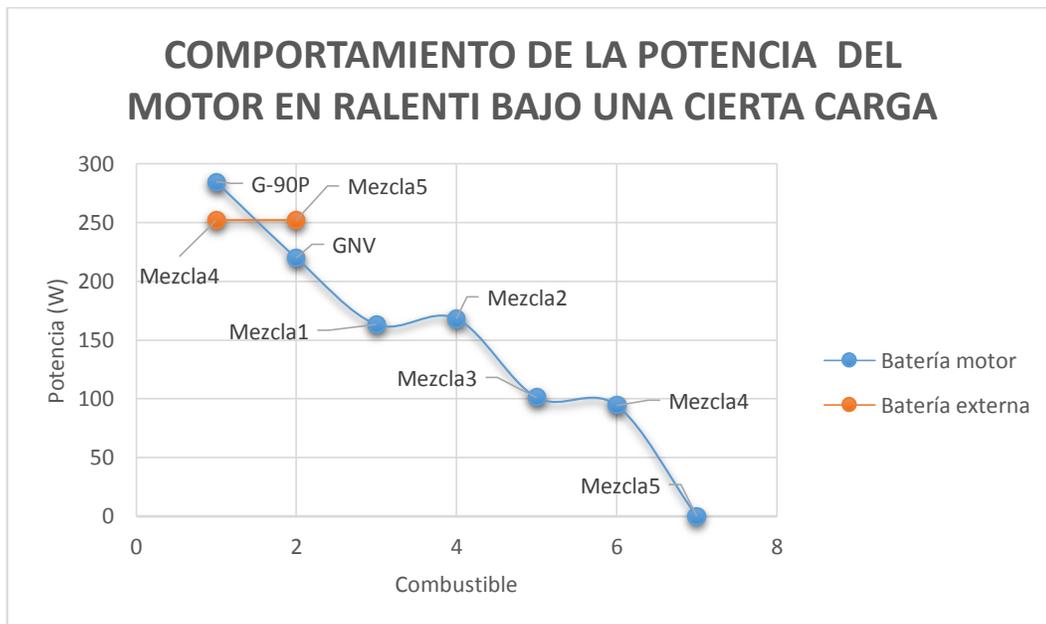
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Potencia Eléctrica con Batería motor y Externa.

Régimen	Condición	Combustible	P.E sistema (W)
Ralentí	Batería motor	G-90P	284,8
	Batería externa	Mezcla 4	252
		Mezcla 5	252

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1. Comportamiento de la Potencia del Motor en Ralentí.

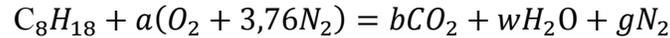


Fuente: Elaboración propia.



5.2 Determinación de los Productos de la Combustión

La ecuación estequiometria de la combustión ideal con 100 % de aire teórico que se produce en un motor Otto es:



La relación aire/combustible será determinada por:

$$\frac{A}{C} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{(NM_{aire})}{(NM)_c + (NM)_H}$$

La entalpía de combustión se determina en base a la ecuación estequiométrica real obtenida anteriormente:

$$h_c = [(N\dot{h}_f)_{CO_2} + (N\dot{h}_f)_{CO} + (N\dot{h}_f)_{H_2O}] - (N\dot{h}_f)_{C_8H_{18}}$$

Donde se tiene que:

N_p = Número de moles de los productos

$h_{f,p}$ = Entalpías de los productos

N_r = Número de moles de los reactivos

$h_{f,r}$ = Entalpías de los reactivos

$$h_c = H_{product} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p (\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r (\dot{h}_f + h - h)_r$$

A continuación se realiza el cálculo de la ecuación estequiométrica, relación aire-combustible, entalpia de la combustión y temperatura de flama adiabática:

Gasohol 90 plus



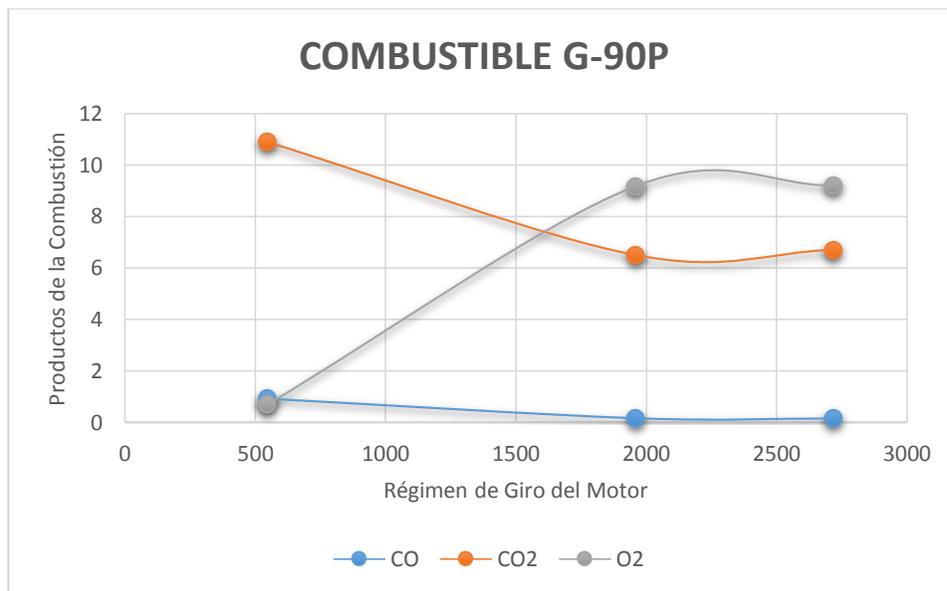
Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

Tabla 11. Valores de los Productos de la Combustión para G-90P.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
760,5	0,2	12,3	3,76
2007	1,57	13,9	0,32
2566	1,44	14	0,31

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para G-90P.

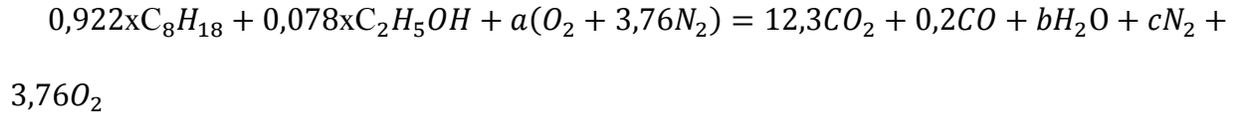


Fuente: Elaboración propia.

Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

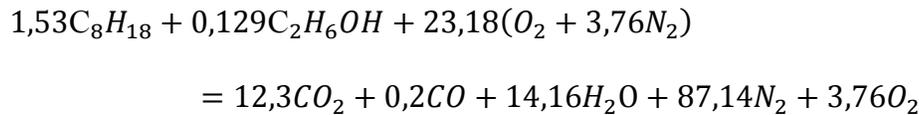
Carbono: $7,376x + 0,156x = 12,3 + 0,2$; entonces: $x = 1,66$

Hidrógeno: $16,596x + 0,468x = 2b$, entonces: $b = 14,16$

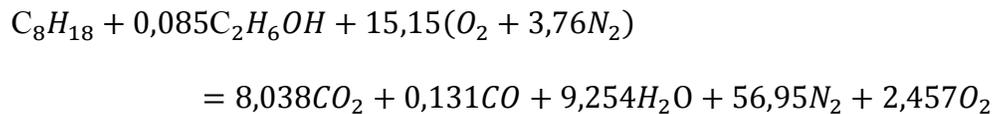
Oxígeno: $0,078x + 2a = 2 \cdot 12,3 + 0,2 + b + 2 \cdot 3,76$, entonces: $a = 23,18$

Nitrógeno $2 \cdot 3,76a = 2c$, entonces: $c = 87,14$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 1,53:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{15,15(4,76 * 29)_{aire}}{(12 * 8 + 0,085 * 12 * 2)_c + (18 + 0,085 * 7)_H + (0,085 * 16)_O} = 17,72$$

$$\frac{A}{C} = 17,72 \left[\frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla de Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$



$$\begin{aligned}
 h_c = & \left[\left(8,038 \text{ mol} * (-393522) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0,131 \text{ mol} * (-110529) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \\
 & + \left(9,254 \text{ mol} * (-241827) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) - \left[\left(1 \text{ mol} * (-249952) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \\
 & \left. \left. + \left(0,085 \text{ mol} * (-277794) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right] \right. \\
 & \left. \left. \left. h_c = -5141,91 \text{ KJ} \right. \right. \right.
 \end{aligned}$$

- **Temperatura de flama adiabática**

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p(\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r(\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -273564,49 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$\begin{aligned}
 H_p = & 8,038 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,131 * (-110529 + \Delta h)CO + 9,254 \\
 & * (-241827 + \Delta h)H_2O + 56,95 * (\Delta h)N_2 + 2,457 * (\Delta h)O_2
 \end{aligned}$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -273564,49 \text{ KJ}$

Si asumimos el valor de T= 3000 K, $H_p = 2517283,15 \text{ KJ}$

Se puede observar que el valor obtenido es muy alto por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo T= 2000 K, $H_p = -657622,39 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:



$$T = 2120,97 \text{ K}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes 760,5 rpm, 2007 rpm y 2566 rpm.

Tabla 12. Relación Aire-Combustible, Entalpía de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para G-90P.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
760,5	17,72	-5141,9	2120,97
2007	14,63	-4944,38	2333,79
2566	14,67	-4963,34	2337,08

Fuente: Elaboración Propia.

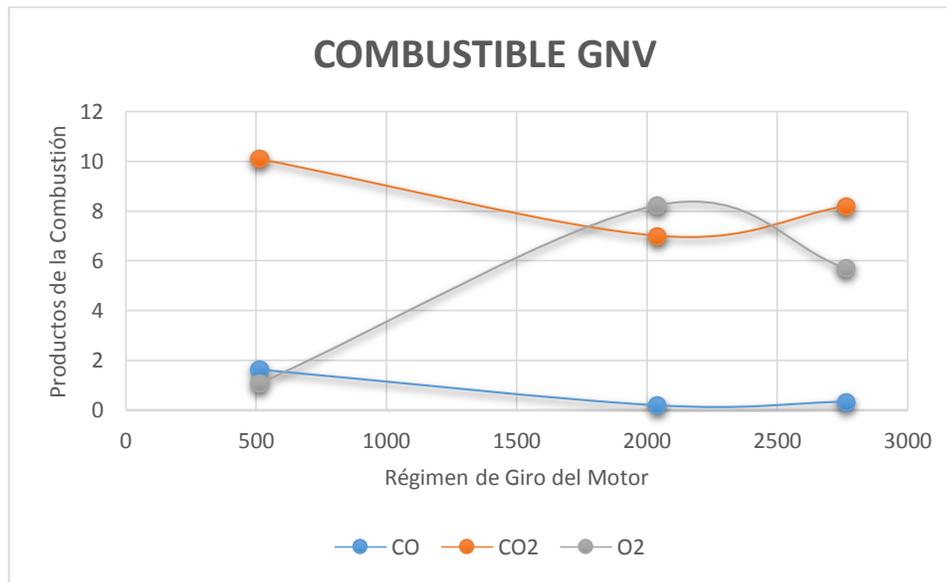
Gas Natural

Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

Tabla 13. Valores de los Productos de la Combustión para GNV.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
775,1	0,25	11,1	1,11
2049	0,19	2,3	15,89
2478	0,21	2,8	15,4

Fuente: Elaboración Propia.

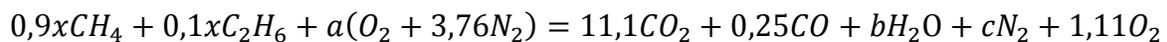
**Gráfico 3.** Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para GNV.

Fuente: Elaboración Propia.

Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

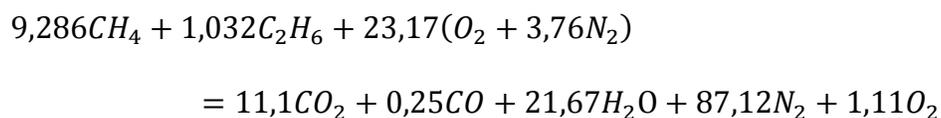
Carbono: $0,9x + 2*0,1x = 11,1 + 0,25$; entonces: $x = 10,32$

Hidrógeno: $4*0,9x + 6*0,1x = 2b$, entonces: $b = 21,67$

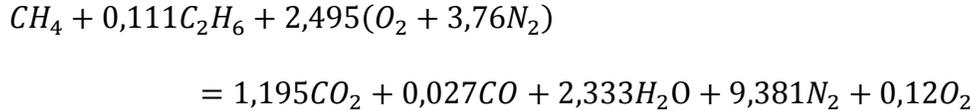
Oxígeno: $a = (2*11,1 + 0,25 + b + 2*1,11)/2$, entonces: $a = 23,17$

Nitrógeno $c = 3,76*a$, entonces: $c = 87,12$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,286:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,495(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 2 * 0,111 * 12)_C + (4 + 6 * 0,111)_H} = 17,82$$

$$\frac{A}{C} = 17,82 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$

$$\begin{aligned}
 h_c = & \left[(1,195 mol * (-393522) \frac{KJ}{Kmol}) + (0,027 mol * (-110529) \frac{KJ}{Kmol}) \right. \\
 & + \left(2,333 mol * (-241827) \frac{KJ}{Kmol} \right) - \left[(1 mol * (-74873) \frac{KJ}{Kmol}) \right. \\
 & \left. \left. + (0,111 mol * (-84667) \frac{KJ}{Kmol}) \right] \right. \\
 & \left. h_c = -953,15 \text{ KJ} \right.
 \end{aligned}$$

- **Temperatura de flama adiabática**

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p (\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r (\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -84271,037 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:



$$H_p = 1,195 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,027 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,333$$

$$* (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,231 * (\Delta h)N_2 + 0,12 * (\Delta h)O_2$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -84271,037$ KJ

Si asumimos el valor de T= 3000 K, $H_p = 324317,41$ KJ

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo T= 500 K, $H_p = -954994.76$ KJ

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:

$$T= 2201,55 \text{ K}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes de 775,1 rpm, 2049 rpm y 2478 rpm.

Tabla 14. Relación Aire-Combustible, Entalpía de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para GNV.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
775,1	17,82	-953,15	2163,52
2049	72,43	-934,48	854,75
2478	61,41	-936,74	859,74

Fuente: Elaboración Propia.

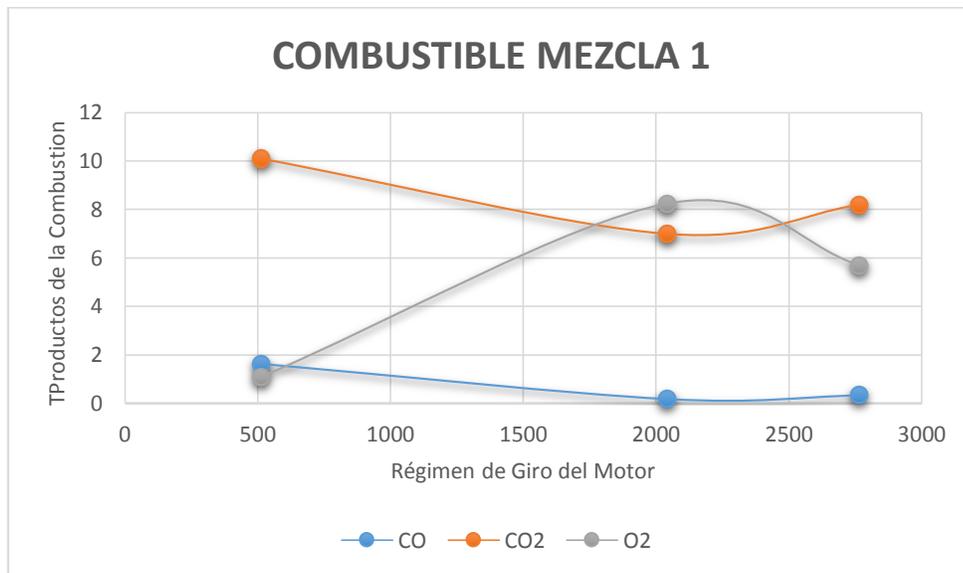
Mezcla 1

Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

**Tabla 15.** Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 1.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
511,8	1,62	10,1	1,08
2041	0,18	7	8,23
2766	0,33	8,2	5,69

Fuente: Elaboración Propia.

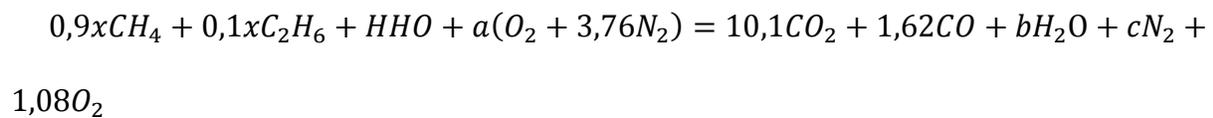
Gráfico 4. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 1.

Fuente: Elaboración Propia.

Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

Carbono: $0,9x + 2*0,1x = 10,1 + 1,62$; entonces: $x = 10,65$

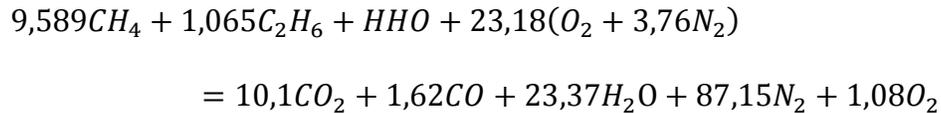


Hidrógeno: $4*0,9x + 6*0,1x + 2 = 2b$, entonces: $b= 23,37$

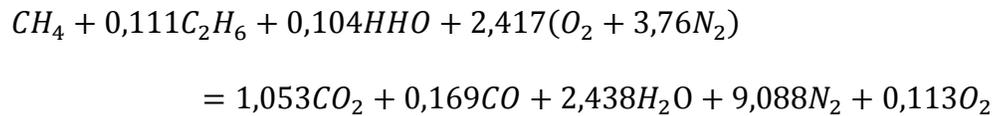
Oxígeno: $1 + 2a = 2*10,1 + 1,62 + b + 2*1,08$, entonces: $a= 23,18$

Nitrógeno $2*3,76a = 2c$, entonces: $c= 87,15$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,589:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,417(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 0,222 * 12)_c + (4 + 0,666 + 2 * 0,104)_H + (16 * 0,104)_O} = 15,73$$

$$\frac{A}{C} = 15,73 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$

$$\begin{aligned} h_c = & \left[(1,053mol * (-393522) \frac{KJ}{Kmol}) + (0,169mol * (-110529) \frac{KJ}{Kmol}) \right. \\ & + (2,438mol * (-241827) \frac{KJ}{Kmol}) - \left[(1mol * (-74873) \frac{KJ}{Kmol}) \right. \\ & \left. \left. + (0,111mol * (-84667) \frac{KJ}{Kmol}) + (0,104mol * (-136096) \frac{KJ}{Kmol}) \right] \right] \end{aligned}$$

$$h_c = -924.21KJ$$

- *Temperatura de flama adiabática*



En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p(\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r(\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -98425,021 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$H_p = 1,053 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,169 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,438 \\ * (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,088 * (\Delta h)N_2 + 0,113 * (\Delta h)O_2$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -98425,021 \text{ KJ}$

$$\text{Si asumimos el valor de } T = 3000 \text{ K, } H_p = 316096,13 \text{ KJ}$$

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo $T = 500 \text{ K}$, $H_p = -941588,49 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:

$$\mathbf{T = 2176,02 \text{ K}}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes de ralentí, 2000 rpm y 3000 rpm.



Tabla 16. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 1.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
511,8	15,73	-924,21	2176,02
2041	23,27	-970,63	1659,07
2766	20,04	-962,86	1857,97

Fuente: Elaboración Propia.

Mezcla 2

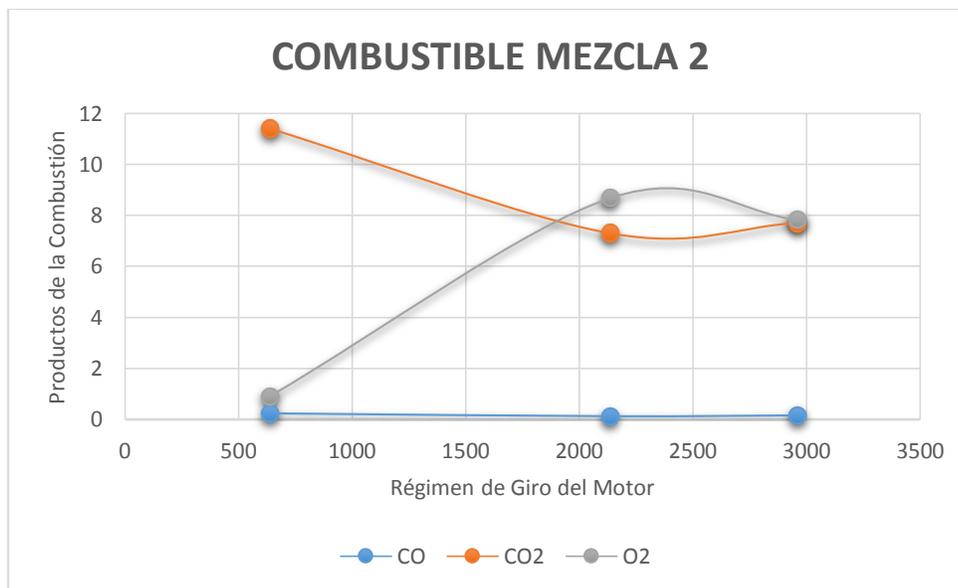
Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

Tabla 17. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 2.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
638,1	0,23	11,4	0,9
2135	0,12	7,3	8,67
2960	0,15	7,7	7,83

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 5. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 2.



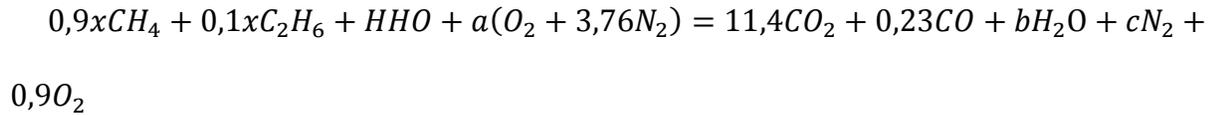
Fuente: Elaboración Propia.



Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

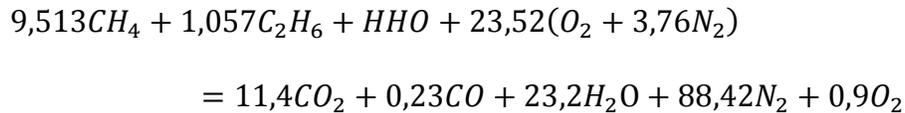
Carbono: $0,9x + 2*0,1x = 11,4 + 0,23$; entonces: $x = 10,57$

Hidrógeno: $4*0,9x + 6*0,1x + 2 = 2b$, entonces: $b = 23,2$

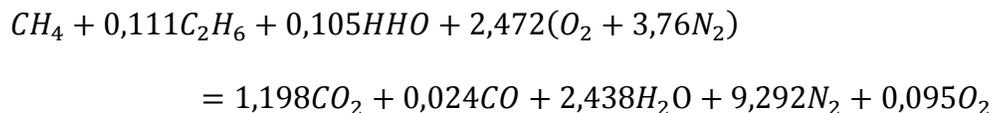
Oxígeno: $1 + 2a = 2*11,4 + 0,23 + b + 2*0,9$, entonces: $a = 23,52$

Nitrógeno $2*3,76a = 2c$, entonces: $c = 88,42$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,513:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,472(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 0,222 * 12)_c + (4 + 0,666 + 2 * 0,105)_H + (16 * 0,105)_O} = 16,08$$

$$\frac{A}{C} = 16,08 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$



$$\begin{aligned}
 h_c = & \left[\left(1,198 \text{ mol} * (-393522) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0,024 \text{ mol} * (-110529) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \\
 & + \left(2,438 \text{ mol} * (-241827) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) - \left[\left(1 \text{ mol} * (-74873) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \\
 & \left. \left. + \left(0,111 \text{ mol} * (-84667) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0,105 \text{ mol} * (-136096) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right] \right] \\
 & \mathbf{h_c = -959,93 \text{ KJ}}
 \end{aligned}$$

- **Temperatura de flama adiabática**

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p(\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r(\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -103732,77 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$\begin{aligned}
 H_p = & 1,198 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,024 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,438 \\
 & * (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,292 * (\Delta h)N_2 + 0,095 * (\Delta h)O_2
 \end{aligned}$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -103732,77 \text{ KJ}$

$$\text{Si asumimos el valor de } T = 500 \text{ K, } H_p = -981180,19 \text{ KJ}$$

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo $T = 3000 \text{ K}$, $H_p = 300816,33 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:



$$T = 2211,1 \text{ K}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes 638,1 rpm, 2135 rpm y 2960 rpm.

Tabla 18. Relación Aire-Combustible, Entalpía de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 2.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
638,1	16,08	-959,93	2211,1
2135	23,57	-972,58	1652,61
2960	22,43	-970,78	1716,97

Fuente: Elaboración Propia.

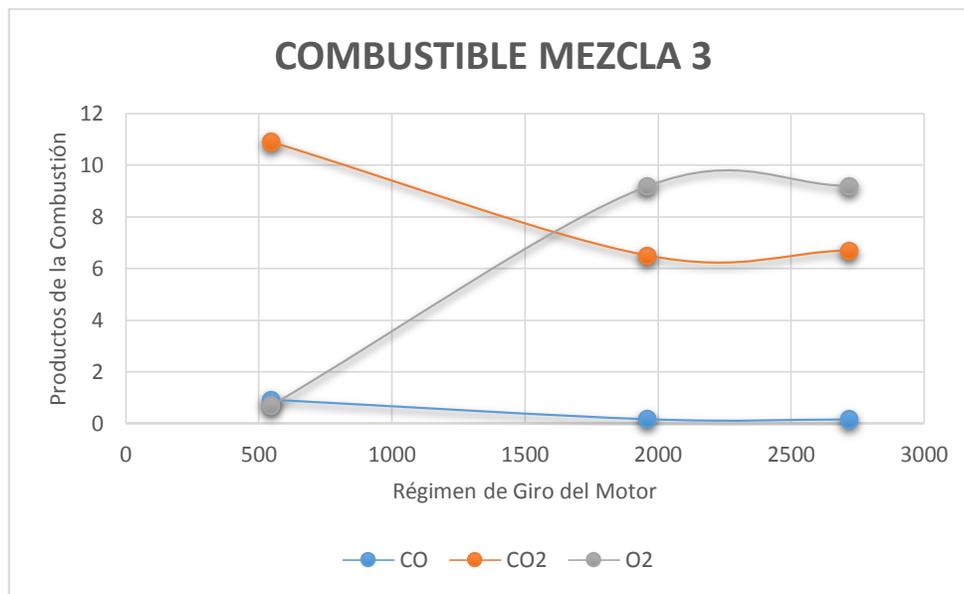
Mezcla 3

Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

Tabla 19. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 3.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
545,3	0,92	10,9	0,69
1959	0,17	6,5	9,18
2717	0,16	6,7	9,2

Fuente: Elaboración Propia.

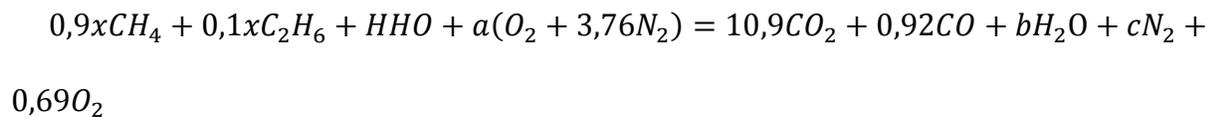
**Gráfico 6.** Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 3.

Fuente: Elaboración Propia.

Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

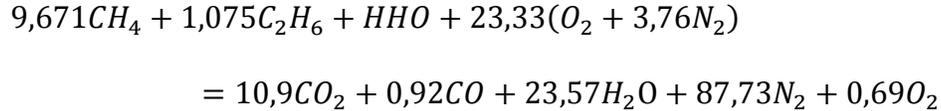
Carbono: $0,9x + 2*0,1x = 10,9 + 0,23$; entonces: $x = 10,75$

Hidrógeno: $4*0,9x + 6*0,1x + 2 = 2b$, entonces: $b = 23,57$

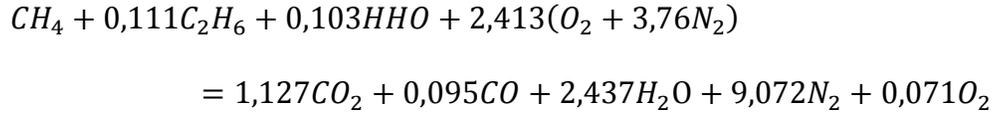
Oxígeno: $1 + 2a = 2*10,9 + 0,92 + b + 2*0,69$, entonces: $a = 23,33$

Nitrógeno: $2*3,76a = 2c$, entonces: $c = 87,73$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,671:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,413(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 0,222 * 12)_c + (4 + 0,666 + 2 * 0,103)_H + (16 * 0,103)_O} = 15,72$$

$$\frac{A}{C} = 15,72 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{product} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$

$$h_c = \left[\left(1,127 mol * (-393522) \frac{KJ}{Kmol} \right) + \left(0,095 mol * (-110529) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right.$$

$$+ \left(2,437 mol * (-241827) \frac{KJ}{Kmol} \right) - \left[\left(1 mol * (-74873) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right.$$

$$\left. \left. + \left(0,111 mol * (-84667) \frac{KJ}{Kmol} \right) + \left(0,103 mol * (-136096) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right] \right]$$

$$h_c = -945,04 \text{ KJ}$$

- **Temperatura de flama adiabática**

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p (\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r (\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:



$$H_r = -98288,93 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$H_p = 1,127 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,095 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,437 \\ * (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,072 * (\Delta h)N_2 + 0,071 * (\Delta h)O_2$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -98288,93 \text{ KJ}$

Si asumimos el valor de T= 3000 K, $H_p = 294055,87 \text{ KJ}$

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo T= 500 K, $H_p = -962468,86 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:

$$T= 2219,38 \text{ K}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes 545,3 rpm, 1959 rpm y 2717 rpm.

Tabla 20. Relación Aire-Combustible, Entalpía de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 3.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
545,3	15,72	-945,04	2219,38
1959	24,74	-971,61	1579,27
2717	24,58	-971,8	1591,31

Fuente: Elaboración Propia.

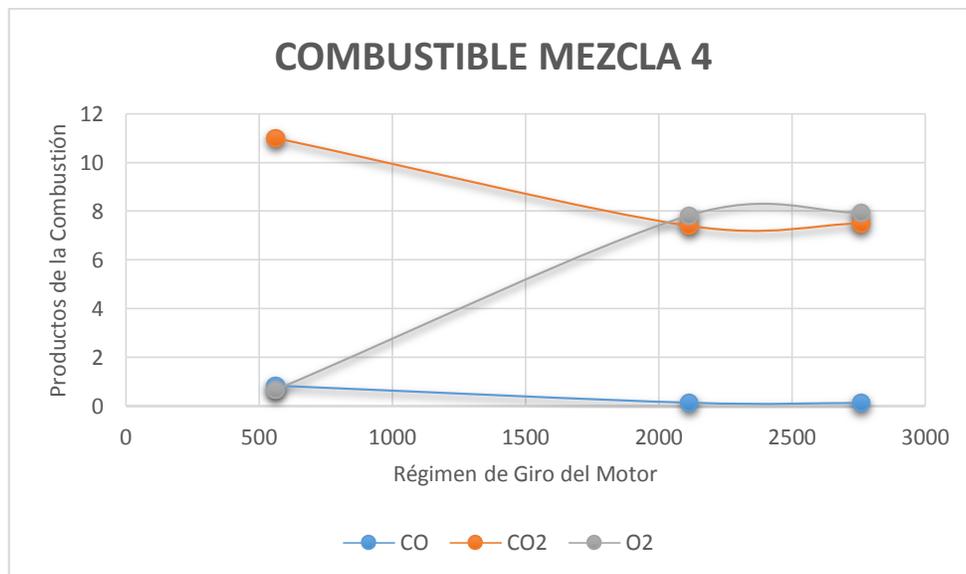
Mezcla 4

Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

**Tabla 21.** Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 4.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
561,3	0,85	11	0,66
2114	0,15	7,4	7,83
2760	0,14	7,5	7,94

Fuente: Elaboración Propia.

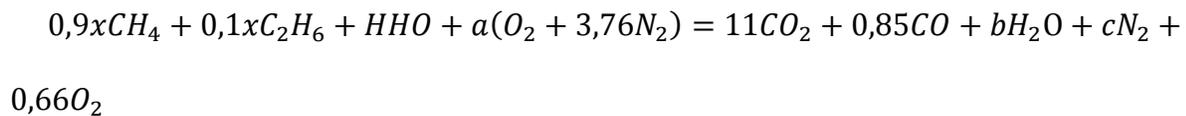
Gráfico 7. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 4.

Fuente: Elaboración Propia.

Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:

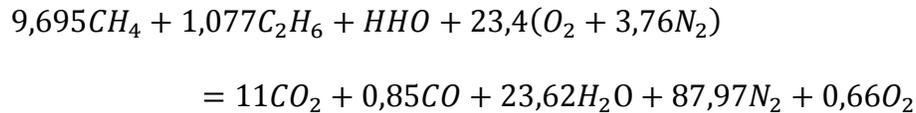


Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

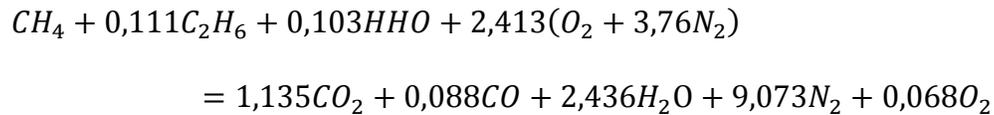


Carbono:	$0,9x + 2*0,1x = 11 + 0,85$; entonces: $x = 10,77$
Hidrógeno:	$4*0,9x + 6*0,1x + 2 = 2b$, entonces: $b = 23,62$
Oxígeno:	$1 + 2a = 2*11 + 0,85 + b + 2*0,66$, entonces: $a = 23,4$
Nitrógeno	$2*3,76a = 2c$, entonces: $c = 87,97$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,695:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,413(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 0,222 * 12)_c + (4 + 0,666 + 2 * 0,103)_H + (16 * 0,103)_O} = 15,72$$

$$\frac{A}{C} = 15,72 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$

$$h_c = \left[\left(1,135mol * (-393522) \frac{KJ}{Kmol} \right) + \left(0,088mol * (-110529) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right. \\ \left. + \left(2,436mol * (-241827) \frac{KJ}{Kmol} \right) - \left[\left(1mol * (-74873) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(0,111mol * (-84667) \frac{KJ}{Kmol} \right) + \left(0,103mol * (-136096) \frac{KJ}{Kmol} \right) \right] \right]$$

$$h_c = -947,18 \text{ KJ}$$

- *Temperatura de flama adiabática*



En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p(\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r(\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -98288,93 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$H_p = 1,135 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,088 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,436 \\ * (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,073 * (\Delta h)N_2 + 0,068 * (\Delta h)O_2$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -98288,93 \text{ KJ}$

Si asumimos el valor de $T=3000\text{K}$, $H_p = 292163,41 \text{ KJ}$

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo $T=500\text{K}$, $H_p = -964595,77 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:

$$T = 2223,3 \text{ K}$$

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes 561,3 rpm, 2114 rpm y 2760 rpm.



Tabla 22. Relación Aire-Combustible, Entalpia de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 4.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
561,3	15,72	-947,18	2223,3
2114	22,62	-971,13	1701,28
2760	22,67	-971,49	1700,39

Fuente: Elaboración Propia.

Mezcla 5

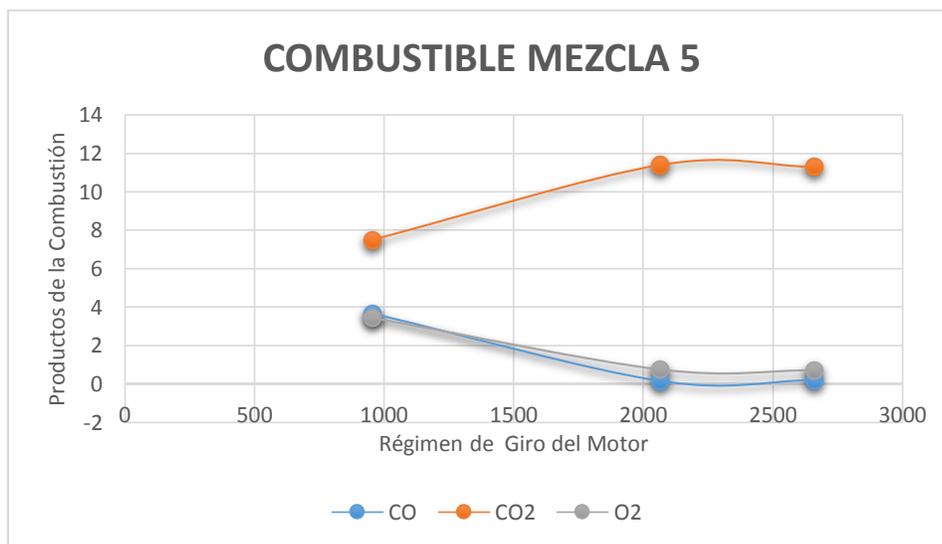
Se tienen los siguientes valores de productos de la combustión:

Tabla 23. Valores de los Productos de la Combustión para Mezcla 5.

REGIMEN (RPM)	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION		
	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	O ₂ (% vol)
953,8	3,66	7,5	3,45
2065	0,15	11,4	0,75
2659	0,19	11,3	0,71

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 8. Productos de la Combustión vs Régimen de Giro del Motor para Mezcla 5.



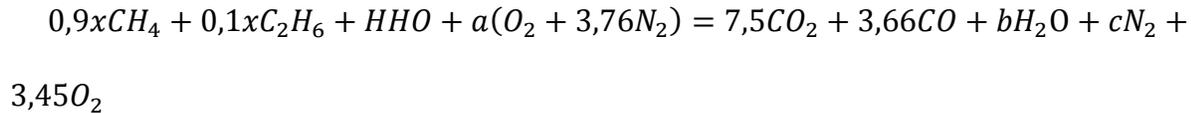
Fuente: Elaboración Propia.



Para obtener nuestros resultados primero debemos empezar realizando la ecuación estequiométrica real a partir de los datos obtenidos en el analizador de gases:

De la tabla, obtenemos los volúmenes en porcentaje para CO, CO₂ y O₂.

La ecuación real de combustión será:



Para poder definir cada variable se igualan los componentes:

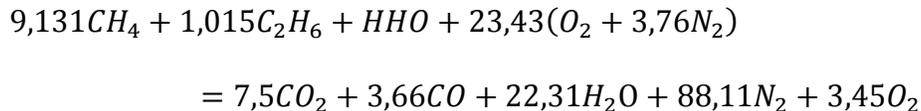
Carbono: $0,9x + 2*0,1x = 7,5 + 3,66$; entonces: $x = 10,15$

Hidrógeno: $4*0,9x + 6*0,1x + 2 = 2b$, entonces: $b = 22,31$

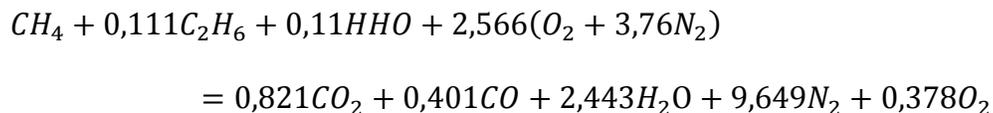
Oxígeno: $1 + 2a = 2*7,5 + 3,66 + b + 2*3,45$, entonces: $a = 23,43$

Nitrógeno $2*3,76a = 2c$, entonces: $c = 88,11$

La ecuación estequiométrica resultará:



Se busca obtener un mol de combustible para lo cual se divide entre 9,131:



Para poder obtener la relación de Aire-Combustible:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,566(4,76 * 29)_{aire}}{(12 + 0,222 * 12)_C + (4 + 0,666 + 2 * 0,11)_H + (16 * 0,11)_O} = 16,63$$

$$\frac{A}{C} = 16,63 \left[\frac{Kg_{aire}}{Kg_{comb}} \right]$$

Hallando la entalpía de combustión: Para este cálculo se utilizó la tabla Entalpía de Formación.

$$h_c = H_{produc} - H_{react} = \sum N_p \dot{h}_{f,p} - \sum N_r \dot{h}_{f,r}$$



$$h_c = \left[\left(0,821 \text{ mol} * (-393522) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0,401 \text{ mol} * (-110529) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \\ \left. + \left(2,443 \text{ mol} * (-241827) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) - \left[\left(1 \text{ mol} * (-74873) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(0,111 \text{ mol} * (-84667) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0,11 \text{ mol} * (-136096) \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \right] \right] \\ h_c = -858,95 \text{ KJ}$$

- **Temperatura de flama adiabática**

En base a la ecuación estequiométrica real se determina la temperatura de la llama adiabática con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react} = \sum N_p(\dot{h}_f + h - h)_p = \sum N_r(\dot{h}_f + h - h)_r$$

Sustituyendo los valores de las tablas de productos y reactantes en la ecuación se tiene que la entalpía de los reactivos es:

$$H_r = -99241,6 \text{ KJ}$$

La entalpía de los productos es:

$$H_p = 0,821 * (-393522 + \Delta h)CO_2 + 0,401 * (-110529 + \Delta h)CO + 2,443 \\ * (-241827 + \Delta h)H_2O + 9,649 * (\Delta h)N_2 + 0,378 * (\Delta h)O_2$$

En donde Δh tomará los valores correspondientes de la tabla según los valores de T. La temperatura de llama adiabática será aquella para lo cual $H_p = H_r = -99241,6 \text{ KJ}$

Si asumimos el valor de T= 3000 K, $H_p = 445432,92 \text{ KJ}$

Se puede observar que el valor obtenido es muy bajo por lo cual se asume otra temperatura, para lo cual asumiendo T= 500 K, $H_p = -872732,02 \text{ KJ}$

Se tiene que a través de una interpolación se obtiene el valor de la temperatura de flama adiabática de:



T= 1966,98 K

A continuación se procederá a reportar los valores de la relación aire-combustible, entalpía de combustión y la temperatura de flama adiabática para diferentes regímenes 953,8 rpm, 2065 rpm y 2659 rpm.

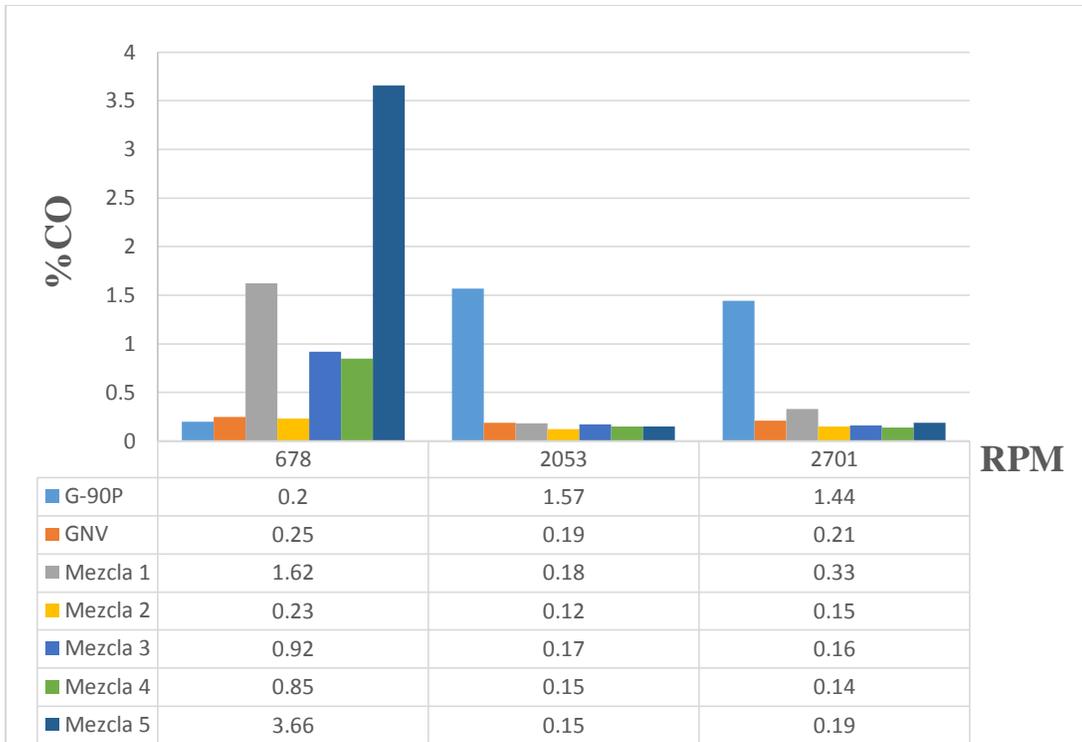
Tabla 24. Relación Aire-Combustible, Entalpía de Combustión y Temperatura de Flama Adiabática para Mezcla 5.

REGIMEN (RPM)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ)	TEMPERATURA DE FLAMA ADIABATICA (K)
953,8	16,63	-858,95	1966,98
2065	15,99	-967,47	2232,44
2659	15,95	-966,58	2234,23

Fuente: Elaboración Propia.

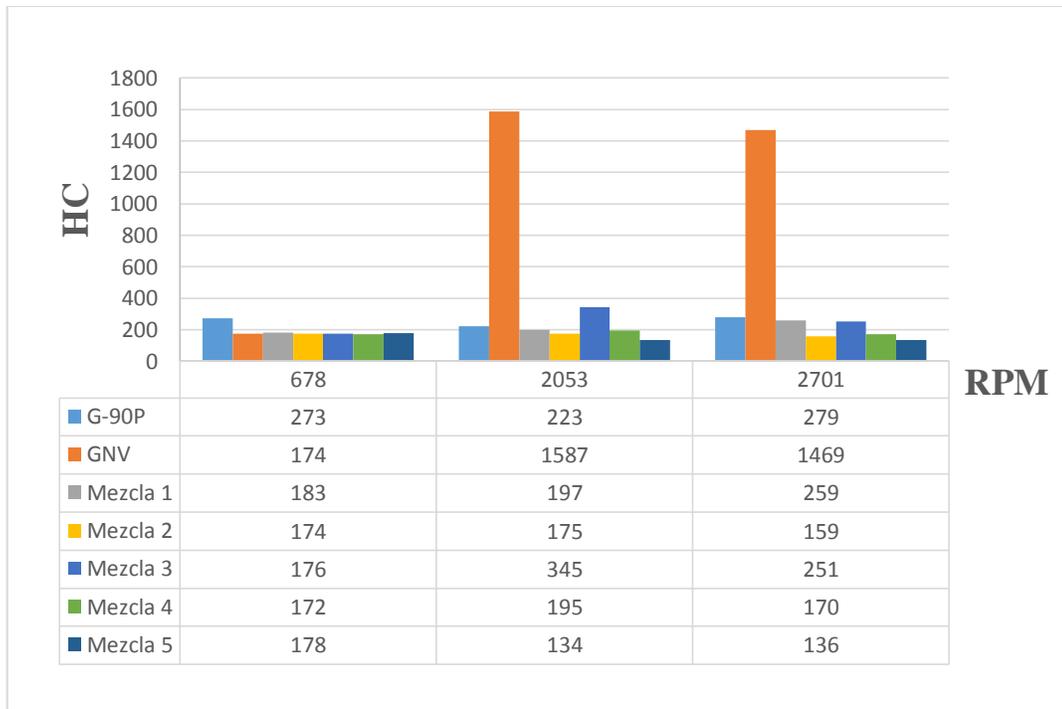
Diagramas comparativos de valores de emisiones de combustible

Gráfico 9. Emisiones de CO.



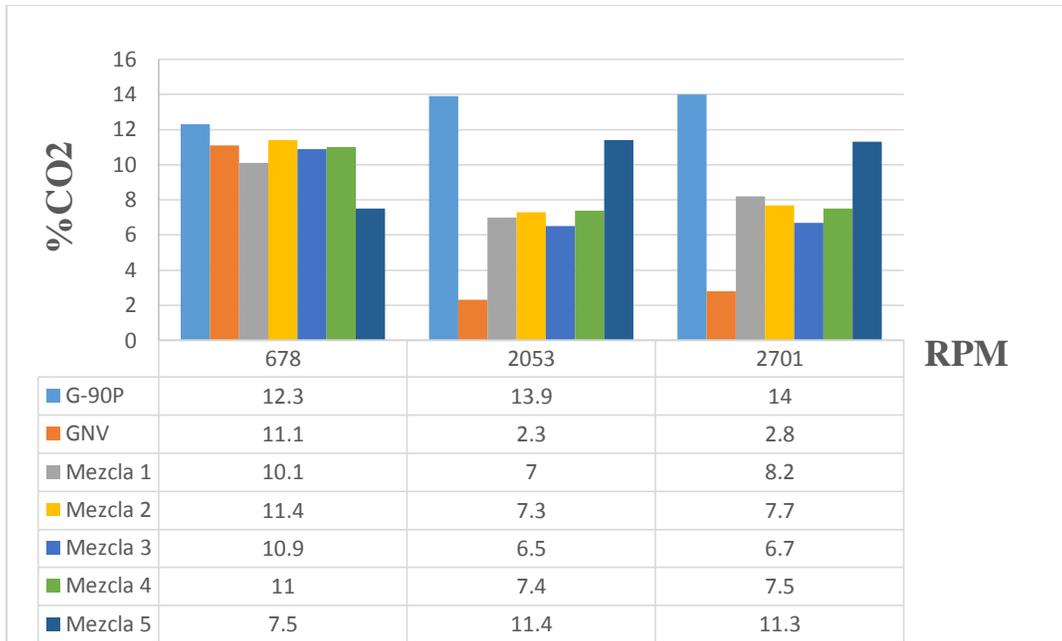
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 10. Emisiones de HC.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 11. Emisiones de CO₂.



Fuente: Elaboración Propia.



5.3 Parámetros de Desempeño

Potencia cedida por el alternador:

$$P_{ele} = V_{cc} * I_{cc} , \text{ en Watts}$$

Dónde:

V_{cc} : Tensión de corriente continua, en voltios (V)

I_{cc} : Intensidad de corriente, en amperios (I)

Rendimiento del alternador:

$$\eta_g = \frac{P_{ele}}{P_{ele} + p}$$

Dónde:

P_{ele} : Potencia cedida por el alternador, en watts (W)

p : Perdidas en el alternador, en Watts (W)

Potencia al freno del motor:

$$N_e = \frac{P_{ele}}{\eta_g * \eta_m} , \text{ en Watts}$$

Dónde:

P_{ele} : Potencia cedida por el alternador, en watts (W)

η_g : Rendimiento del alternador

η_m : Rendimiento de la transmisión (correa)

Momento efectivo del motor:

$$M_e = \frac{60 * N_e}{2 * \pi * n} , \text{ en Nm}$$

Donde:

N_e : Potencia al freno del motor, en watts (W)

n : Velocidad rotacional del cigüeñal, en rpm



Presión media efectiva del motor:

$$P_{me} = \frac{60 * N_e * x}{V_h * n}, \text{ en Mpa}$$

Donde:

V_h : Cilindrada del motor

x : Número de revoluciones necesarias por cada carrera de potencia producida.

Consumo horario de aire:

$$G_a = 0,36 * \rho_a * v_a * A_{ad}, \text{ en kg/h}$$

Donde:

v_a : Velocidad del aire, en m/s

A_{ad} : Area de la sección de ingreso de aire, en cm^2

ρ_a : Densidad del aire, que se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{1,293 * P_o * 273}{760 * T_o + 273}$$

Donde:

P_o : Presión barométrica

T_o : Temperatura atmosférica, en $^{\circ}\text{C}$

Coefficiente de llenado (eficiencia volumétrica):

$$\eta_v = \frac{10^6 * \tau * G_a}{60 * V_h * \rho_a * n}$$

Donde:

τ : Número de tiempos del motor, en nuestro caso $\tau=4$

V_h : Cilindrada del motor



Para poder determinar la potencia del motor, se procedió a instalar un banco de focos que fue alimentado por un alternador del motor. Esta medición sólo se realizó en ralentí debido a la capacidad del alternador.

A continuación se muestra el siguiente cuadro de resultados:

Rendimiento del generador: 0,67

Rendimiento de la transmisión (correa): 0,98

Revoluciones necesarias por cada carrera de la potencia producida: 2

Cilindrada del motor: 1800 cc

Tabla 25. Valores de los Parámetros de Desempeño del Motor en Ralentí.

Régimen	Condición	Combustible	RPM inicial	Voltaje Inicial (V)	Corriente (I)	Voltaje (V)	RPM final	Potencia eléctrica (W)	Potencia al freno del motor (W)	Momento efectivo del motor (N.m)	Presión media efectiva del motor (Mpa)
Ralentí	Batería motor	G-90P	819,9	14,2	32	8,9	665,1	284,8	433,75	6,228	0,044
		GNV	833,1	14,2	25	8,8	561,1	220	335,059	5,702	0,040
		MEZCLA 1	647,9	13,9	19	8,6	553,6	163,4	248,858	4,293	0,030
		MEZCLA 2	645,3	14	17	9,9	555,7	168,3	256,32	4,405	0,031
		MEZCLA 3	468,1	13,9	11	9,2	446,4	101,2	154,127	3,297	0,023
		MEZCLA 4	596,7	13,8	8	11,8	530,9	94,4	143,771	2,586	0,018
		MEZCLA 5	548,7	13,8	0	0	0	0	0	0	0
	Batería externa	MEZCLA 4	843,6	14,2	28	9	558	252	383,795	6,568	0,046
		MEZCLA 5	955	14,3	30	8,4	633,9	252	383,795	5,782	0,040

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo de los consumos de combustible

Para el cálculo de los flujos volumétricos de los combustibles, se prosigue de la siguiente manera:

1) Flujo volumétrico del G-90P

Para el cálculo de consumo de gasolina se tiene que:



V_g = Volumen de G-90P

t_g = Tiempo de funcionamiento del motor

ρ_g = Densidad de la G-90P

Por lo tanto se tiene que:

$$G_C = 3.6\rho_g \frac{V_g}{t_g} \text{ (Kg/hr)} \text{ o } G_C = 3.6 \frac{V_g}{t_g} \text{ (L/hr)}$$

Teniendo en cuenta que la densidad de la gasohol 90 plus en estado líquido es: 0,769 (Kg/L)

$$g_c = 3.6\rho_g \frac{V_g}{t_g}$$

- **Condición del motor en ralentí (805 rpm)**

Vconsumido= 150 mL

Tiempo de prueba= 5 min

$$g_c = \frac{0,15 \text{ l}}{0,083 \text{ hr}} = 1,8 \text{ L/hr} = 1,384 \text{ Kg/h}$$

- **Condición del motor (1997 rpm)**

Vconsumido= 65 mL

Tiempo de prueba= 1 min

$$g_c = \frac{0,065 \text{ l}}{0,017 \text{ hr}} = 3,9 \text{ L/hr} = 2,999 \text{ Kg/h}$$

- **Condición del motor en ralentí (2900 rpm)**

Vconsumido= 75 mL

Tiempo de prueba= 1 min

$$g_c = \frac{0,075 \text{ l}}{0,017 \text{ hr}} = 4,5 \text{ L/hr} = 3,461 \text{ Kg/h}$$

2) Flujo másico de GNV

- **Condición del motor en ralentí (800-1000 rpm)**



Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 92 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,837$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{92 \text{ (bar)}}{0,837 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 4,608 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 90 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,84$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2} V = \frac{P_2}{Z_2 R T_2} V = \frac{90 \text{ (bar)}}{0,84 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 4,492 \text{ (Kg)}$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 45 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{4,608 \text{ (Kg)} - 4,492 \text{ (Kg)}}{10 \text{ (min)}} = 0,116 \text{ (g/s)} = 0,698 \text{ (Kg/h)}$$

- **Condición del motor a una velocidad media de 2000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 90 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,84$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{90 \text{ (bar)}}{0,84 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 4,492 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 89,2 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,8415$$



$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2}V = \frac{P_2}{Z_2RT_2}V = \frac{89,2(\text{bar})}{0,8415 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}\right) * (25+273,15)\text{K}} * 65(\text{litros}) = 4,444 (\text{Kg})$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{4,492 (\text{Kg}) - 4,444 (\text{Kg})}{3 (\text{min})} = 0,266 (\text{g/s}) = 0,958 (\text{Kg/h})$$

- **Condición del motor a una velocidad media de 3000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 89,2 (\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,842$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1}V = \frac{P_1}{Z_1RT_1}V = \frac{89,2 (\text{bar})}{0,842 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}\right) * (25+273,15)\text{K}} * 65(\text{litros}) = 4,444 (\text{Kg})$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 88 (\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,843$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2}V = \frac{P_2}{Z_2RT_2}V = \frac{88(\text{bar})}{0,843 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}\right) * (25+273,15)\text{K}} * 65(\text{litros}) = 4,377 (\text{Kg})$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{4,444 (\text{Kg}) - 4,377 (\text{Kg})}{2 (\text{min})} = 0,563 (\text{g/s}) = 2,027 (\text{Kg/h})$$

3) Flujo másico de GNV en mezcla 4

- **Condición del motor en ralentí (800-1000 rpm)**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.



Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 82 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,852$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{82 \text{ (bar)}}{0,852 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 4,035 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 81 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,854$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2} V = \frac{P_2}{Z_2 R T_2} V = \frac{81 \text{ (bar)}}{0,854 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 3,979 \text{ (Kg)}$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 45 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{4,035 \text{ (Kg)} - 3,979 \text{ (Kg)}}{15 \text{ (min)}} = 0,0625 \text{ (g/s)} = 0,225 \text{ (Kg/h)}$$

- **Condición del motor a una velocidad media de 2000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 81 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,854$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{81 \text{ (bar)}}{0,854 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 3,979 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 80,4 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,855$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2} V = \frac{P_2}{Z_2 R T_2} V = \frac{80,4 \text{ (bar)}}{0,855 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{ K}} * 65 \text{ (litros)} = 3,942 \text{ (Kg)}$$



Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{3,979(Kg) - 3,942(Kg)}{3(min)} = 0,202 (g/s) = 0,727 (Kg/h)$$

- **Condición del motor a una velocidad media de 3000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 80,4(\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_1 = 25^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,855$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{80,4 (\text{bar})}{0,855 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{K}} * 65 (\text{litros}) = 3,942 (Kg)$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 79,5 (\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_2 = 25^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,8565$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2} V = \frac{P_2}{Z_2 R T_2} V = \frac{79,5 (\text{bar})}{0,8565 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{K}} * 65 (\text{litros}) = 3,891 (Kg)$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{3,942(Kg) - 3,891(Kg)}{2 (min)} = 0,425 (g/s) = 0,698 (Kg/h) = 1,53 (Kg/h)$$

4) Flujo másico de GNV en mezcla 5

- **Condición del motor en ralentí (800-1000 rpm)**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 79,5 (\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_1 = 25^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,8565$$



$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1}V = \frac{P_1}{Z_1RT_1}V = \frac{79,5 \text{ (bar)}}{0,8565 * 0,52 \left(\frac{KJ}{KgK}\right) * (25 + 273,15)K} * 65 \text{ (litros)} = 3,891 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 76 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ °C} \text{ y } Z_2 = 0,861$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2}V = \frac{P_2}{Z_2RT_2}V = \frac{76 \text{ (bar)}}{0,861 * 0,52 \left(\frac{KJ}{KgK}\right) * (25 + 273,15)K} * 65 \text{ (litros)} = 3,7007 \text{ (Kg)}$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 45 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{3,891 \text{ (Kg)} - 3,7007 \text{ (Kg)}}{15 \text{ (min)}} = 0,212 \text{ (g/s)} = 0,763 \text{ (Kg/h)}$$

- **Condición del motor a una velocidad media de 2000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 76 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_1 = 25 \text{ °C} \text{ y } Z_1 = 0,861$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1}V = \frac{P_1}{Z_1RT_1}V = \frac{76 \text{ (bar)}}{0,861 * 0,52 \left(\frac{KJ}{KgK}\right) * (25 + 273,15)K} * 65 \text{ (litros)} = 3,7007 \text{ (Kg)}$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 74 \text{ (bar)}, V = 65 \text{ (litros)}, R = 0,52 \text{ (KJ/Kg.K)}, T_2 = 25 \text{ °C} \text{ y } Z_2 = 0,864$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2}V = \frac{P_2}{Z_2RT_2}V = \frac{74 \text{ (bar)}}{0,864 * 0,52 \left(\frac{KJ}{KgK}\right) * (25 + 273,15)K} * 65 \text{ (litros)} = 3,591 \text{ (Kg)}$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{3,7007 \text{ (Kg)} - 3,591 \text{ (Kg)}}{3 \text{ (min)}} = 0,611 \text{ (g/s)} = 2,199 \text{ (Kg/h)}$$



- **Condición del motor a una velocidad media de 3000 rpm**

Primero calcularemos la masa de GNV a una determinada condición (1) de presión y temperatura.

Se tiene que las condiciones de trabajo son:

$$P_1 = 74(\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_1 = 0,864$$

$$m_{GNV1} = \rho_{GNV1} V = \frac{P_1}{Z_1 R T_1} V = \frac{74 (\text{bar})}{0,864 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{K}} * 65 (\text{litros}) = 3,591 (\text{Kg})$$

Ahora determinamos la masa de GNV a una determinada condición (2) de presión y temperatura.

$$P_2 = 72(\text{bar}), V = 65 (\text{litros}), R = 0,52 (\text{KJ/Kg.K}), T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } Z_2 = 0,867$$

$$m_{GNV2} = \rho_{GNV2} V = \frac{P_2}{Z_2 R T_2} V = \frac{72 (\text{bar})}{0,867 * 0,52 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \right) * (25 + 273,15) \text{K}} * 65 (\text{litros}) = 3,482 (\text{Kg})$$

Teniendo las masas bajo una condición (1) y (2), todo esto bajo un tiempo de prueba de 3 minutos, procedemos a calcular el flujo másico:

$$\dot{m}_{GNV} = \frac{m_{GNV1} - m_{GNV2}}{t} = \dot{m}_{GNV} = \frac{3,591 (\text{Kg}) - 3,482 (\text{Kg})}{2 (\text{min})} = 0,909 (\text{g/s}) = 3,272 (\text{Kg/h})$$

5) **Flujo volumétrico del gas HHO**

Para poder determinar la cantidad de gas que genera el generador, partiremos de unas premisas y condiciones determinadas. Calcularemos el gas que se genera durante un tiempo $t = 60\text{s}$ determinado y una intensidad determinada. Las condiciones de presión y de temperatura son de 0,69 atm y 25°C, las cuales son condiciones a las que trabaja el generador.

El electrolito usado variará durante nuestra prueba, ya que a consecuencia de la variación de electrolito se tendrá diferente corriente en el generador, lo que lleva a una diferente temperatura dentro del generador.



Ahora procederemos a realizar el cálculo del gas producido a diferentes contenidos de NaOH, los cuales son 3%, 4% y 5%.

- ***Cálculo del flujo volumétrico de gas HHO con un 3% de soluto***

Se sabe que se usó 1 litro de agua destilada con 30 gramos de NaOH y durante la prueba la corriente registrada fue de 23A.

$$Q = I \cdot t = 23 \cdot 60 = 1380 \text{ C}$$

Teniendo una temperatura de gas $T = 26,53 \text{ }^\circ\text{C}$, constante de gases ideales $R = 0.082 \text{ atmL/molK}$ y una constante de Faraday $F = 96485$, se tiene que:

$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{1380}{2 \cdot 96485} = 0,007151 \text{ mol}$$

$$V_{H_2} = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,007151 \cdot 0,082 \cdot (26,53 + 273)}{0,69} = 0,255 \text{ L}$$

El volumen de H_2 total, será el doble, a razón que se dispone dos conexiones al cátodo:

$$V_{H_2 \text{ total}} = 0,509 \text{ L}$$

Ahora procedemos a hallar el volumen de oxígeno, donde se tiene que:

$$V_{O_2 \text{ total}} = \frac{V_{H_2}}{2} = 0,255 \text{ L}$$

Por último se procede a hallar el volumen total de gas HHO producido:

$$V_{HHO} = V_{H_2} + V_{O_2} = 0,764 \text{ L} = 0,0154 \text{ (Kg/h)}$$

- ***Cálculo del flujo volumétrico de gas HHO con un 4% de soluto***

Se sabe que se usó 1 litro de agua destilada con 40 gramos de NaOH y durante la prueba la corriente registrada fue de 30A.

$$Q = I \cdot t = 30 \cdot 60 = 1800 \text{ C}$$

Teniendo una temperatura de gas $T = 28,93 \text{ }^\circ\text{C}$, constante de gases ideales $R = 0.082 \text{ atmL/molK}$ y una constante de Faraday $F = 96485$, se tiene que:



$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{1800}{2 \cdot 96485} = 0,009328 \text{ mol}$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,009328 \cdot 0,082 \cdot (28,93 + 273)}{0,69} = 0,335 \text{ L}$$

El volumen de H₂ total, será el doble, a razón que se dispone dos conexiones al cátodo:

$$V_{H_2 total} = 0,669 \text{ L}$$

Ahora procedemos a hallar el volumen de oxígeno, donde se tiene que:

$$V_{O_2 total} = \frac{V_{H_2}}{2} = 0,335 \text{ L}$$

Por último se procede a hallar el volumen total de gas HHO producido:

$$V_{HHO} = V_{H_2} + V_{O_2} = 1,004 \text{ L} = 0,0201 \text{ (Kg/h)}$$

- **Cálculo del flujo volumétrico de gas HHO con un 5% de soluto**

Se sabe que se usó 1 litro de agua destilada con 50 gramos de NaOH y durante la prueba la corriente registrada fue de 33A.

$$Q = I \cdot t = 33 \cdot 60 = 1980 \text{ C}$$

Teniendo una temperatura de gas T= 36,67 °C, constante de gases ideales R= 0.082 atmL/molK y una constante de Faraday F= 96485, se tiene que:

$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{1980}{2 \cdot 96485} = 0,0103 \text{ mol}$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,0103 \cdot 0,082 \cdot (36,67 + 273)}{0,69} = 0,378 \text{ L}$$

El volumen de H₂ total, será el doble, a razón que se dispone dos conexiones al cátodo:

$$V_{H_2 total} = 0,755 \text{ L}$$

Ahora procedemos a hallar el volumen de oxígeno, donde se tiene que:

$$V_{O_2 total} = \frac{V_{H_2}}{2} = 0,378 \text{ L}$$

Por último se procede a hallar el volumen total de gas HHO producido:



$$V_{HHO} = V_{H_2} + V_{O_2} = 1,133 \text{ L} = 0,0222 \text{ (Kg/h)}$$

Debido a las altas temperaturas producidas en el generador, se calculará la producción de gas HHO también para la mezcla 4 y mezcla 5, pues los valores de temperatura dentro del generador son influyentes:

- **Cálculo del flujo volumétrico de gas HHO (mezcla 4)**

Se sabe que se usó 1 litro de agua destilada con 50 gramos de NaOH y durante la prueba la corriente registrada fue de 33A.

$$Q = I \cdot t = 33 \cdot 60 = 1980 \text{ C}$$

Teniendo una temperatura de gas $T = 51,57 \text{ }^\circ\text{C}$, constante de gases ideales $R = 0.082 \text{ atmL/molK}$ y una constante de Faraday $F = 96485$, se tiene que:

$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{1980}{2 \cdot 96485} = 0,0103 \text{ mol}$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,0103 \cdot 0,082 \cdot (51,57 + 273)}{0,69} = 0,398 \text{ L}$$

El volumen de H_2 total, será el doble, a razón que se dispone dos conexiones al cátodo:

$$V_{H_2 \text{ total}} = 0,792 \text{ L}$$

Ahora procedemos a hallar el volumen de oxígeno, donde se tiene que:

$$V_{O_2 \text{ total}} = \frac{V_{H_2}}{2} = 0,396 \text{ L}$$

Por último se procede a hallar el volumen total de gas HHO producido:

$$V_{HHO} = V_{H_2} + V_{O_2} = 1,187 \text{ L} = 0,0222 \text{ (Kg/h)}$$

- **Cálculo del flujo volumétrico de gas HHO (mezcla 5)**

Se sabe que se usó 1 litro de agua destilada con 50 gramos de NaOH y durante la prueba la corriente registrada fue de 33A.

$$Q = I \cdot t = 33 \cdot 60 = 1980 \text{ C}$$



Teniendo una temperatura de gas $T = 63,6 \text{ }^\circ\text{C}$, constante de gases ideales $R = 0.082 \text{ atmL/molK}$ y una constante de Faraday $F = 96485$, se tiene que:

$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{1980}{2 \cdot 96485} = 0,0103 \text{ mol}$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,0103 \cdot 0,082 \cdot (63,6 + 273)}{0,69} = 0,41 \text{ L}$$

El volumen de H_2 total, será el doble, a razón que se dispone dos conexiones al cátodo:

$$V_{\text{H}_2 \text{ total}} = 0,821 \text{ L}$$

Ahora procedemos a hallar el volumen de oxígeno, donde se tiene que:

$$V_{\text{O}_2 \text{ total}} = \frac{V_{\text{H}_2}}{2} = 0,41 \text{ L}$$

Por último se procede a hallar el volumen total de gas HHO producido:

$$V_{\text{HHO}} = V_{\text{H}_2} + V_{\text{O}_2} = 1,231 \text{ L} = 0,0222 \text{ (Kg/h)}$$

Teniendo los siguientes datos:

Tabla 26. Tabla de Datos consumos.

Datos			
Presión ambiente (mmHg)	514,7		
Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)	23,7		
Densidad del aire (kg/m ³)	0,806		
Area ingreso de aire (cm ²)	26,42		
τ (tiempos)	4		
Cilindrada	1800		
Densidad de gasohol (g/cm ³)	0,769	0,769	0,769
Volumen de gasohol (cm ³)	150	65	75
Tiempo (seg)	300	60	60

Fuente: Elaboración Propia.



Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 27. Valores de Consumo de Aire y Combustible.

Resumen de Consumo de Aire y Combustible							
COMBUSTIBLE	G-90P	GNV	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4	MEZCLA 5
RPM	760,5	775,1	511,8	638,1	545,3	561,3	953,8
V (m/s)	1	2	1,2	1,7	1,3	1,5	1,7
Gasto de aire (kg/h)	7,663	15,327	9,196	13,028	9,962	11,495	13,028
Eficiencia volumétrica	0,463	0,909	0,826	0,938	0,840	0,941	0,628
Gasto de combustible (kg/h)	1,384	0,698	0,713	0,718	0,720	0,247	0,785
COMBUSTIBLE	G-90P	GNV	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4	MEZCLA 5
RPM	2007	2049	2041	2135	1959	2114	2065
V (m/s)	3,4	5	5	6	5	5	3,2
Gasto de aire (kg/h)	26,055	38,317	38,317	45,980	38,317	38,317	24,523
Eficiencia volumétrica	0,597	0,860	0,863	0,990	0,899	0,833	0,546
Gasto de combustible (kg/h)	2,999	0,958	0,973	0,978	0,980	0,749	2,221
COMBUSTIBLE	G-90P	GNV	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4	MEZCLA 5
RPM	2566	2478	2766	2960	2717	2760	2659
V (m/s)	5,9	6	7	8	7	6,3	5,1
Gasto de aire (kg/h)	45,214	45,980	53,644	61,307	53,644	48,279	39,083
Eficiencia volumétrica	0,810	0,853	0,891	0,952	0,908	0,804	0,676
Gasto de combustible (kg/h)	3,461	2,027	2,042	2,047	2,049	1,552	3,294

Fuente: Elaboración Propia.

5.4 Análisis de Resultados

Metodología

El trabajo realizado está orientado a la experimentación, para lo cual se observará la influencia de la mezcla gas natural e hidrógeno en los productos de la combustión de un motor gasoliner, trabajando con distintos porcentajes de hidrógeno a diferentes regímenes del motor y realizando 3 veces cada ensayo en la ciudad del Cusco a 3399 m.s.n.m. Para correlacionar los datos se utilizará



herramientas como Excel, matemática estadística, matlab y medidores como el analizador de gases, amperímetro, anemómetro, tacómetro y termómetro infrarrojo.

Método Cuantitativo

El método utilizado es el cuantitativo ya que se cuantificarán los ensayos de los productos de la combustión.

Alcance de la investigación

El alcance de la investigación muestra la influencia que tiene las mezclas de gas natural e hidrógeno en los productos de la combustión a diferentes regímenes de giro del motor.

Diseño de la investigación

La investigación realizada es netamente experimental, por lo cual para la validación de datos se realizará el Análisis de la Varianza (**ANOVA**) comprobando el mismo tratamiento con el test de **TUKEY**.

Población de estudio

Se procederá a procesar los datos obtenidos y calculados de los Productos de la Combustión.

Tipo de Muestra

Nuestra experimentación se basa en medir los distintos productos de la combustión utilizando las mezclas de gas natural e hidrógeno con distintos porcentajes de electrolito (3%,4%,5%), todo esto a diferentes velocidades de giro (ralentí, 1800 - 2200 rpm y 2800 -3200 rpm), realizando estas mediciones 3 veces por cada mezcla.

Determinación del tamaño de la muestra

Se determinará para el uso del motor con Gasohol 90 plus, GNV, mezcla 1, 2, 3, 4 y 5.

Recolección de datos

- ***Técnicas de recolección de datos***



Para proceder a la recolección de datos de las pruebas realizadas en el motor Toyota 1S de 1,8L se procederá a tomar los datos a través de fotografías para cada prueba realizada.

- ***Técnica de recolección cuantitativa***

La técnica de recolección de datos cuantitativos se refiere al uso de los números, los cuales serán usados para calcular los productos de la combustión que genera el motor. Estos datos serán evaluados mediante el tratamiento estadístico y así comprobar la hipótesis que planteamos.

Análisis de resultados

Deberá registrarse cada valor de los productos de la combustión de CO, HC, CO₂, O₂ y el valor del coeficiente de exceso de aire λ :

**Plan de análisis de datos****Tabla 28.** Plan de Análisis de Datos.

Hipótesis a ser probada	Hipótesis Nula (Ho) Hipótesis Alternativa (Ha)	Confiabilidad	Prueba estadística	Regla de Decisión
La variación de la mezcla y los regímenes de giro disminuyen la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	Ho La variación de la mezcla y los regímenes de giro no disminuyen la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	95%	Análisis de Varianza y Test de Tukey	$P > 0,5$ se acepta el Ho
	Ha La variación de la mezcla y los regímenes de giro si disminuyen la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	95%	Análisis de Varianza y Test de Tukey	$P < 0,5$ se acepta la Ha

Fuente: Elaboración Propia.

Procesamiento de datos**1) Emisiones de CO en ralentí**

Para los resultados de la emisión de CO se realizó pruebas con 7 cargas frescas distintas, para esto se tuvo que realizar la prueba 3 veces, obteniéndose el mejor promedio para cada caso, es así que se muestran los resultados en las siguientes tablas.

**Tabla 29.** Valores de CO en Ralenti.

Emisiones de CO-Ralenti							
Prueba	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
1	0,21	0,47	1,68	0,35	1,37	0,9	4,05
2	0,2	0,35	1,63	0,32	1,11	0,85	3,88
3	0,2	0,25	1,62	0,23	0,92	0,85	3,66
Promedio	0,203	0,357	1,643	0,317	1,133	0,867	3,863

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 30. Análisis de Varianza de un Factor.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	0,61	0,2033333	3,333E-05
Columna 2	3	1,07	0,3566667	0,0121333
Columna 3	3	4,93	1,6433333	0,0010333
Columna 4	3	0,95	0,3166667	0,0012333
Columna 5	3	3,4	1,1333333	0,0510333
Columna 6	3	2,6	0,8666667	0,0008333
Columna 7	3	11,59	3,8633333	0,0382333

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 31. Resultados de Análisis de Varianza.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	29,76	6	4,96	323,875	3,406E-14	2,848
Dentro de los grupos	0,214	14	0,015			
Total	29,974	20				

Fuente: Elaboración Propia.



Prueba de Tukey

Tabla 32. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

HSD= 0,345	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-0,153	-1,44	-0,097	-0,93	-0,663	-3,66
GNV			-1,287	0,057	-0,777	-0,51	-3,507
Mezcla 1				1,343	0,51	0,777	-2,22
Mezcla 2					-0,833	-0,567	-3,563
Mezcla 3						0,267	-2,73
Mezcla 4							-2,997
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

Así como se ha realizado el análisis de la varianza de las emisiones del porcentaje de CO en volumen en ralentí, se procederá a hallar los valores de HC y CO₂ para 1800 - 2200 rpm y 2800 – 3200 rpm mostrados en la siguiente tabla resumen:

Tabla 33. Resumen de Valores del Análisis de Varianza (mezclas).

		Análisis de Varianza			
		F	Probabilidad ad	Valor crítico de F	HSD
Emisiones de CO	Emisiones de CO-Ralentí	323,875	3,406E-14	2,848	0,345
	Emisiones de CO- (1800-2200)rpm	1178,889	4,21E-18	2,848	0,075
	Emisiones de CO- (2800-3200)rpm	940,782	2,033E-17	2,848	0,075
	Emisiones de HC-Ralentí	122,135	2,834E-11	2,848	15,798



Emisiones de HC	Emisiones de HC- (1800-2200)rpm	529,534	1,117E-15	2,848	113,36
	Emisiones de HC- (2800-3200)rpm	417,852	5,805E-15	2,848	118,493
Emisiones de CO₂	Emisiones de CO ₂ -Ralentí	1393,467	1,31E-18	2,848	0,192
	Emisiones de CO ₂ - (1800-2200)rpm	937,667	2,081E-17	2,848	0,602
	Emisiones de CO ₂ -(2800-3200)rpm	837,161	4,591E-17	2,848	0,599

Fuente: Elaboración Propia.

Después de haber realizado el Análisis de la Varianza se procederá a mostrar los cuadros de Tukey para cada condición:

2) Emisiones de CO a 1800 - 2200 rpm

Tabla 34. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

HSD= 0,075	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		1,39	1,39	1,427	1,4	1,417	1,383
GNV			0	0,037	0,01	0,027	-0,007
Mezcla 1				0,037	0,01	0,027	-0,007
Mezcla 2					-0,027	-0,01	-0,043
Mezcla 3						0,017	-0,017
Mezcla 4							-0,033
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.



3) Emisiones de CO a 2800 - 3200 rpm

Tabla 35. Análisis por Grupos para HSD de CO para Mezclas.

HSD= 0,075	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		1,253	1,163	1,287	1,293	1,297	1,163
GNV			-0,09	0,033	0,04	0,043	-0,09
Mezcla 1				0,123	0,13	0,133	0
Mezcla 2					0,007	0,01	-0,123
Mezcla 3						0,003	-0,13
Mezcla 4							-0,133
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

4) Emisiones de HC en Ralentí

Tabla 36. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

HSD= 15,798	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-178,5	-182,797	-173,797	-176,13	-173,13	-191,463
GNV			-182,643	-173,643	-175,977	-172,977	-191,31
Mezcla 1				-172,357	-174,69	-171,69	-190,023
Mezcla 2					-176,033	-173,033	-191,367
Mezcla 3						-172,2	-190,533
Mezcla 4							-18,333
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

5) Emisiones de HC a 1800 - 2200 rpm

Tabla 37. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

HSD= 113,36	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-1654	-217,763	-256,097	-368,097	-221,43	-135,43
GNV			-219,153	-257,487	-369,487	-222,82	-136,82
Mezcla 1				-257,487	-369,487	-222,82	-136,82
Mezcla 2					-369,523	-222,857	-136,857
Mezcla 3						-222,83	-136,83
Mezcla 4							86
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.



6) Emisiones de HC a 2800 - 3200 rpm

Tabla 38. Análisis por Grupos para HSD de HC para Mezclas.

HSD= 118,493	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-1550	-256,88	-222,547	-249,88	-225,213	-136,547
GNV			-258,133	-223,8	-251,133	-226,467	-137,8
Mezcla 1				-223,71	-251,043	-226,377	-137,71
Mezcla 2					-251,167	-226,5	-137,833
Mezcla 3						-226,507	-137,833
Mezcla 4							88,667
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

7) Emisiones de CO₂ en Ralentí

Tabla 39. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

HSD= 0,192	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-10,83	-9,897	-11,197	-10,63	-10,797	-7,363
GNV			-9,743	-11,043	-10,477	-10,643	-7,21
Mezcla 1				-9,757	-9,19	-9,357	-5,923
Mezcla 2					-10,533	-10,7	-7,267
Mezcla 3						-9,867	-6,433
Mezcla 4							3,433
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

8) Emisiones de CO₂ a 1800 - 2200 rpm

Tabla 40. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

HSD= 0,602	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		0,497	-5,363	-5,263	-4,83	-5,463	-9,863
GNV			-6,753	-6,653	-6,22	-6,853	-11,253
Mezcla 1				-6,653	-6,22	-6,853	-11,253
Mezcla 2					-6,257	-6,89	-11,29
Mezcla 3						-6,863	-11,263
Mezcla 4							-4,4
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.



9) Emisiones de CO₂ a 2800 - 3200 rpm

Tabla 41. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Mezclas.

HSD= 0,599	G-90P	GNV	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
G-90P		-1,28	-6,413	-6,047	-5,247	-5,78	-9,913
GNV			-7,667	-7,3	-6,5	-7,033	-11,167
Mezcla 1				-7,21	-6,41	-6,943	-11,077
Mezcla 2					-6,533	-7,067	-11,2
Mezcla 3						-7,073	-11,207
Mezcla 4							-4,133
Mezcla 5							

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora se pretende determinar la influencia del régimen del motor en las emisiones de CO para diferentes cargas frescas (sólo se mostrará la influencia de las mezclas). A continuación se muestra una tabla resumen con todos los resultados del Análisis de Varianza:

Tabla 42. Resumen de Valores del Análisis de Varianza (régimen de giro).

		Análisis de Varianza			
		F	Probabilidad	Valor crítico de F	HSD
Emisiones de CO	Emisiones de CO-(Mezcla 1)	2269,911	2,3E-09	5,143	0,074
	Emisiones de CO-(Mezcla 2)	41,912	0,0003	5,143	0,063
	Emisiones de CO-(Mezcla 3)	55,125	0,00014	5,143	0,327
	Emisiones de CO-(Mezcla 4)	1381,303	1,018E-08	5,143	0,048
	Emisiones de CO-(Mezcla 5)	877,225	3,959E-08	5,143	0,307
	Emisiones de HC-(Mezcla 1)	24,072	0,0014	5,143	33,326



Emisiones de HC	Emisiones de HC-(Mezcla 2)	1,737	0,254	5,143	138,634
	Emisiones de HC-(Mezcla 3)	75,471	5,588E-05	5,143	48,695
	Emisiones de HC-(Mezcla 4)	2,58	0,156	5,143	80,491
	Emisiones de HC-(Mezcla 5)	44,617	0,00025	5,143	20,322
Emisiones de CO₂	Emisiones de CO ₂ -(Mezcla 1)	274,962	1,257E-06	5,143	0,426
	Emisiones de CO ₂ -(Mezcla 2)	234,7	2,01E-06	5,143	0,699
	Emisiones de CO ₂ -(Mezcla 3)	4143,25	3,788E-10	5,143	0,167
	Emisiones de CO ₂ -(Mezcla 4)	182,203	4,25E-06	5,143	0,718
	Emisiones de CO ₂ -(Mezcla 5)	1495,11	8,03E-09	5,143	0,251

Fuente: Elaboración Propia.

Después de haber realizado el Análisis de la Varianza se procederá a mostrar los cuadros de Tukey para cada condición:



10) Emisiones de CO de las mezclas

Tabla 43. Análisis por Grupos para HSD de CO para Regímenes.

Mezcla 1				Mezcla 2			
HSD= 0,074	511,8 RPM	2041 RPM	2766 RPM	HSD= 0,063	638,1 RPM	2135 RPM	2960 RPM
511,8 RPM		1,463	1,353	638,1 RPM		0,173	0,15
2041 RPM			-0,11	2135 RPM			-0,023
2766 RPM				2960 RPM			
Mezcla 3				Mezcla 4			
HSD= 0,327	545,3 RPM	1959 RPM	2717 RPM	HSD= 0,048	561,3 RPM	2114 RPM	2760 RPM
545,3 RPM		0,963	0,973	561,3 RPM		0,713	0,71
1959 RPM			0,01	2114 RPM			-0,003
2717 RPM				2760 RPM			
Mezcla 5							
HSD= 0,307	953,8 RPM		2065 RPM		2659 RPM		
953,8 RPM			3,677		3,573		
2065 RPM					-0,103		
2659 RPM							

Fuente: Elaboración Propia.

11) Emisiones de HC de las mezclas

Tabla 44. Análisis por Grupos para HSD de HC para Regímenes.

Mezcla 1				Mezcla 2			
HSD= 33,326	511,8 RPM	2041 RPM	2766 RPM	HSD= 138,634	638,1 RPM	2135 RPM	2960 RPM
511,8 RPM		-36.333	-75.333	638,1 RPM		-83.667	-50
2041 RPM			-39	2135 RPM			33.667
2766 RPM				2960 RPM			



Mezcla 3				Mezcla 4			
HSD= 48,695	545,3 RPM	1959 RPM	2717 RPM	HSD= 80,491	561,3 RPM	2114 RPM	2760 RPM
545,3 RPM		-193,333	-75	561,3 RPM		-49,667	-53,333
1959 RPM			118,333	2114 RPM			-3,667
2717 RPM				2760 RPM			
Mezcla 5							
HSD= 20,322	953,8 RPM		2065 RPM		2659 RPM		
953,8 RPM			54,667		53,667		
2065 RPM					-1		
2659 RPM							

Fuente: Elaboración Propia.

12) Emisiones de CO₂ de las mezclas

Tabla 45. Análisis por Grupos para HSD de CO₂ para Regímenes.

Mezcla 1				Mezcla 2			
HSD= 0,426	511,8 RPM	2041 RPM	2766 RPM	HSD= 0,699	638,1 RPM	2135 RPM	2960 RPM
511,8 RPM		3,167	2,233	638,1 RPM		4,567	3,9
2041 RPM			-0,933	2135 RPM			-0,667
2766 RPM				2960 RPM			
Mezcla 3				Mezcla 4			
HSD= 0,167	545,3 RPM	1959 RPM	2717 RPM	HSD= 0,718	561,3 RPM	2114 RPM	2760 RPM
545,3 RPM		4,433	4,133	561,3 RPM		3,967	3,767
1959 RPM			-0,3	2114 RPM			-0,2
2717 RPM				2760 RPM			
Mezcla 5							
HSD= 0,251	953,8 RPM		2065 RPM		2659 RPM		
953,8 RPM			-3,867		-3,867		
2065 RPM					0		
2659 RPM							

Fuente: Elaboración Propia.



5.5 Precio y Ahorro de los Combustibles

Se tomaron los precios para el gasohol 90 plus y gas natural del sistema Facilito-Osinergmin, asimismo, se obtuvo como referencia el precio del kw-h de la empresa Electro Sur Este para determinar el consumo eléctrico del equipo generador de hidrógeno, todo ello para calcular el ahorro de la mezcla 5 respecto al gasohol 90 plus cuando el motor funciona sin carga.

Consideraciones

Se realizó la comparativa del costo de los combustibles para una hora de funcionamiento del motor al régimen de 2800 – 3200 rpm.

Se consideró el costo del kw-h de la empresa distribuidora como costo directo para carga de la batería.

Cálculo

Se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 46. Costo de kg de GNV.

Volumen (l)	Capacidad (m ³)	Masa (kg)	Costo	Costo (Masa-Gas)
50	12,5	7,9	21,125	2,674

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 47. Resultado de Ahorro de Combustible.

Combustible		Consumo	Costo Unitario (S/)	Costo Total (S/)		Ahorro (%)
G-90P		1,189 (*)	10,99	13,066		0
GNV		2,027 (**)	2,674	5,419		58,53
Mezcla 5	GNV	3,272 (**)	2,674	8,750	8,920	31,73
	HHO	0,396 (***)	0,4295	0,170		

Fuente: Elaboración Propia. * (gl/h), ** (kg/h) y *** (kw-h)



CONCLUSIONES

- De la experimentación se observa que los mejores resultados en emisiones de HC se obtienen con las mezclas mezcla 4 y mezcla 5, pues durante estas mezclas se reguló la cantidad de entrada de gas natural en ralentí (poca entrada de gas natural) y en altas rpm (mayor ingreso de gas natural), lo que da a entender que la entrada de gas natural en el motor es influyente, es así que se tuvieron reducciones del 37%, 40% y 51% respecto al G-90P para tres distintos regímenes de funcionamiento.
- De la experimentación se observa que manteniendo constante la válvula de regulación de gas y variando el caudal de hidrógeno, bajo dos distintos regímenes de motor (2135 y 2960 rpm); la mezcla 2 (40 gramos de soda caustica en solución para la producción de hidrógeno) disminuye de mejor manera el CO respecto al Gasohol 90 Plus, obteniéndose reducciones del 92% y 89% respectivamente.
- De la experimentación se observa que manteniendo constante la válvula de regulación de gas y variando el caudal de hidrógeno, bajo tres distintos regímenes de motor (638,1, 2135 y 2960 rpm); la mezcla 2 (40 gramos de soda caustica en solución para la producción de hidrógeno) disminuye de mejor manera los HC respecto al Gasohol 90 Plus, obteniéndose reducciones del 36,26%, 21,52% y 43% respectivamente.
- De la experimentación se observa que manteniendo constante la válvula de regulación de gas y variando el caudal de hidrógeno, bajo dos distintos regímenes de motor (1959 y 2717 rpm); la mezcla 3 (50 gramos de soda caustica en solución para la producción de hidrógeno) disminuye de mejor manera el CO₂ respecto al Gasohol 90 Plus, obteniéndose reducciones del 53,24% y 52,14% respectivamente.



- De la experimentación se observa que a medida que se varía el régimen del motor la temperatura de flama adiabática varía, siendo el valor más alto de temperatura de flama adiabática cuando se trabaja con mezclas ricas.
- De la experimentación se observa que, de todas las experiencias en medición de potencia en ralentí, la mezcla 2 (40 gramos de soda caustica en solución para la producción de hidrógeno) puede encender 2 focos de 100 W (potencia medida en el banco de focos de 168,3 W), con la cual se registró una pérdida del 40,91% respecto al gasohol 90 plus.
- De la experimentación se observa que las mezclas 4 y mezcla 5 mejoran su desempeño en potencia utilizando una batería externa para la generación del hidrógeno, teniendo una pérdida respecto al Gasohol 90 Plus de 11,51%.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio de la producción del hidrógeno en base a fuentes de energía renovable para que la producción de hidrógeno sea sustentable en el tiempo.
- Se recomienda usar caudalímetros de hidrógeno y gas natural para tener datos de consumo con un menor margen de error durante las pruebas.
- Se recomienda la instalación de un dispositivo electrónico que pueda procesar diferentes voltajes de corriente continua (que soporte gran flujo de corriente), para poder así tener diferentes flujos de Hidrógeno con la misma solución.
- Se recomienda las medidas de seguridad pertinentes para la instalación y uso de gas natural e hidrógeno.
- Se recomienda el uso de bujías para gas natural, para una mejora de la combustión.
- Se recomienda el uso de un software para la simulación del ingreso de aire y combustible al motor y para ver el comportamiento de la combustión del gas natural e hidrógeno.



BIBLIOGRAFIA

- Alzamora Taype, I., & Poblete Loyola, M. (2012). Evaluación de gases de efecto invernadero en la cuenca atmosférica del valle del Cusco. Cusco, Perú.
- Baquero Aguas, M. L., & Avila Jaime, O. H. (21 de Enero de 2008). Automatización y diseño del sistema mezclador de combustible en vehículos con equipos de conversión a gas natural. Bogotá, Colombia.
- Bellido Márquez, M. (2016). Agentes de deterioro medioambientales. *Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 63.
- Caituro Valenzuela, F., & Florez Condori, J. W. (2013). Influencia del hidrógeno en el desarrollo de la potencia del motor modelo Honda EP650 gasolinero. Cusco, Perú.
- Cusco, G. A. (2003). *Calidad de aire en el Cusco*. Cusco.
- García Posada, J. M., Amell Arrieta, A., & Burbano Martínez, H. J. (2006). *Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano*. Medellín.
- Holgado Secas, H. (2012). *Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrogeno por electrólisis*. Barcelona.
- Jovaj, M. (1982). *Motores de automóvil*. Moscú: Mir.
- Lira Cacho, G. (2011). *El uso del GNV*. Lima.
- López Rojas, S. A. (Abril de 2008). Consideraciones técnicas y económicas de vehículos a gas natural. Lima, Perú.
- Nanthagopal, K., Subbarao, R., Elango, T., Baskar, P., & Annamalai, K. (s.f.). *Hidrogeno enriquecido al gas natural comprimido-Un combustible futurista para motores de combustión interna*. India.



- Perú, M. d. (2013-2014). *Informe nacional de la calidad del aire*. Lima.
- Postigo, J., & Cruz, J. (2010). *Temodinamica II*. Lima: WH Editores.
- Públicos, S. N. (2017). *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. Obtenido de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia>
- Tigubó, H., Galante, N., Macchello, S., Franzi, R., & Baglioni, C. (2011). *Desarrollo del combustible híbrido gaseoso (GNV+H₂) en motores de transporte público y de carga*. Argentina.
- Trigubó, I., Galante, I., Macchello, I., Franzi, I., & Baglioni, I. (2011). *Desarrollo del Combustible Híbrido Gaseoso (GNC + H₂) en Motores de Transporte Público y de Carga*. Argentina.
- Uribarri, F. (2018). La prueba de carbono 14 amenazada. *XL Semanal*.



ANEXOS

Anexo A. Matriz de Consistencia.

Anexo B:

Anexo B1. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Aire.

Anexo B2. Valores de Límites Máximos Permisibles.

Anexo B3. Normas EURO sobre Emisiones.

Anexo C:

Anexo C1. Precio de Gas Natural Vehicular.

Anexo C2. Precio de Gasohol 90 Plus.

Anexo C3. Coeficiente de Compresibilidad.

Anexo C4. Entalpías de Formación Estándar.

Anexo C5. Valores Críticos para la Prueba de TUKEY.

Anexo C6. Composición de Gas Natural (Camisea).

Anexo C7. Esquema General.

Anexo C8. Certificado de Calibración de Analizador de Gases.

Anexo C9. Protocolo de Prueba – Productos de la Combustión.

Anexo C10. Protocolo de Prueba – Potencia en Ralentí.

Anexo D. Plano N° 1.01: Soporte de Motor.

Anexo E:

Anexo E1. Plano N° 2.01: Electrolizador.

Anexo E2. Plano N° 2.02: Electrolizador - Explosión.

Anexo E3. Plano N° 2.03: Electrolizador – Tapa Delantera.

Anexo E4. Plano N° 2.04: Electrolizador – Junta.



Anexo E5. Plano N° 2.05: Electrolizador – Electrodo de Conexión.

Anexo E6. Plano N° 2.06: Electrolizador – Electrodo Neutro.

Anexo E7. Plano N° 2.07: Electrolizador – Tapa Trasera.

Anexo E8. Plano N° 2.08: Electrolizador – Soporte 1.

Anexo E9. Plano N° 2.09: Electrolizador – Pata.

Anexo E10. Plano N° 2.10: Electrolizador – Soporte 2.

Anexo E11. Plano N° 2.11: Electrolizador – Soporte 3.



ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	V. Independientes
¿Cómo evaluar la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco?	Evaluar experimentalmente la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	Es posible utilizar la mezcla de gas natural e hidrogeno y disminuir la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	Régimen de giro del motor. Mezcla gas natural e hidrogeno.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Especificas	V. Dependiente
¿Cómo evaluar la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco a diferentes regímenes de giro del motor? ¿Cómo evaluar la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando diferentes mezclas de gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco?	Evaluar experimentalmente la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco a diferentes regímenes de giro del motor. Evaluar experimentalmente la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L utilizando diferentes mezclas de gas natural e hidrogeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	Es posible utilizar la mezcla de gas natural e hidrogeno y disminuir la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco a diferentes regímenes de giro del motor. Es posible utilizar diferentes mezclas de gas natural e hidrogeno y disminuir la emisión de los productos de la combustión en un motor gasolinero Toyota 1S de 1.8L bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco.	Productos de la combustión.

Fuente: Elaboración Propia.



ANEXO B1. ESTANDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL DE AIRE.

Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire

Parámetros	Periodo	Valor [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Criterios de evaluación	Método de análisis ^[10]
Benceno (C_6H_6)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO_2)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras ($\text{PM}_{2.5}$)	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10})	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) ^[11]	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS)
				0
				Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	Método automático
Ozono (O_3)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM_{10}	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM_{10} (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)



NE: No Exceder.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: microgramos por metro cúbico a condiciones estándar (25 °C y 1 atmósfera).

^[10] Método equivalente aprobado.

^[11] El estándar de calidad ambiental para Mercurio Gaseoso Total entrará en vigencia según lo establecido en la Sexta Disposición Complementaria Final del presente Decreto Supremo.

Fuente: Publicado en el Diario el Peruano, Pág. 9, 2017.

**ANEXO B2. VALORES DE LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES.****VALORES DE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES****I. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VEHÍCULOS EN CIRCULACIÓN Y PARA INSPECCIÓN TÉCNICA A NIVEL NACIONAL**

VEHÍCULOS DE LAS CATEGORÍAS L ₃ a L ₅ CON MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA DE DOS TIEMPOS QUE USAN MEZCLA DE GASOLINA – ACEITE COMO COMBUSTIBLE (valores con adaptador)			
Año de Fabricación (*)	Altitud m.s.n.m.	CO % de volumen	HC ppm
Hasta 1995	0 a 1800	4,5	12000
	> 1800	4,5	12600
1996 a 2012	0 a 1800	4,5	8000
	> 1800	4,5	8400
2013 en adelante	a cualquier altitud	4,5	8000

VEHÍCULOS DE LAS CATEGORÍAS L ₃ a L ₅ CON MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA DE CUATRO TIEMPOS QUE USAN GASOLINA, GLP o GNV COMO COMBUSTIBLE U OTROS COMBUSTIBLES ALTERNOS (valores con adaptador)			
Año de Fabricación (*)	Altitud m.s.n.m.	CO % de volumen	HC ppm
Hasta 1995	0 a 1800	4,5	2000
	> 1800	4,5	2100
1996 a 2012	0 a 1800	4,5	2000
	> 1800	4,5	2100
2013 en adelante	a cualquier altitud	4,5	2000

VEHÍCULOS DE LAS CATEGORÍAS L ₃ a L ₅ CON MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE CUATRO TIEMPOS A DIESEL O SIMILAR (valores con adaptador)		
Año de Fabricación (*)	Altitud m.s.n.m.	Coefficiente de Absorción : k(m ⁻¹)
Hasta 1995	0 a 1000	3,40
	1001 a 2000	3,65
	2001 a 3000	3,90
	> 3000	4,15
1996 a 2012	0 a 1000	2,80
	1001 a 2000	3,05
	2001 a 3000	3,30
	> 3000	3,55
2013 en adelante	0 a 1000	2,50
	1001 a 2000	2,75
	2001 a 3000	3,00
	> 3000	3,25

(*NOTA: El año de fabricación es el año calendario en el que el vehículo fue fabricado, que no corresponde necesariamente el año modelo, y se encuentra consignado en la Tarjeta de Propiedad o Tarjeta de Identificación Vehicular.

VEHÍCULOS DE LAS CATEGORÍAS M y N CON MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA A GASOLINA, GAS LICUADO DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL VEHICULAR U OTROS COMBUSTIBLES ALTERNOS				
Año de Fabricación (*)	Altitud m.s.n.m.	CO % de Volumen	HC (ppm)	CO + CO ₂ % (mínimo)
Hasta 1995	0 a 1800	3,0	400	10 ⁽¹⁾
	> 1800	3,0	450	8
1996 a 2002	0 a 1800	2,5	300	10 ⁽¹⁾
	> 1800	2,5	350	8
2003 en adelante	a cualquier altitud	0,5	100	12 ⁽¹⁾

(1) Solo para GLP / GNV el valor mínimo de CO + CO₂ será 8%



**ANEXO B3. NORMAS EURO SOBRE EMISIONES.****Normas europeas sobre emisiones para turismos (categoría M1*), en g/km**

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Diésel						
<u>Euro1</u>	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
<u>Euro 2, IDI</u>	Enero de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
<u>Euro 2, DI</u>	Enero de ^a	1.0	-	0.9	-	0.10
<u>Euro3</u>	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
<u>Euro4</u>	Enero de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
<u>Euro5</u>	Septiembre de 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
<u>Euro6</u>	Septiembre de 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005
Gasolina						
<u>Euro1</u>	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
<u>Euro2</u>	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
<u>Euro3</u>	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
<u>Euro4</u>	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
<u>Euro5</u>	Septiembre de 2009	1.0	0.10	-	0.08	0.005 ^b
<u>Euro6</u>	Septiembre de 2014	1.0	0.10	-	0.08	0.005
* Antes de <u>EuroV</u> turismos > 2500 kg estaban clasificados en la categoría <u>Vehículo industrial ligero N1 - I</u>						

Fuente: Normativa Europea.

**ANEXO CI. PRECIO DE GAS NATURAL VEHICULAR.**

Precio Reportado por los operadores de los Establecimientos de Venta al Público de GNV

Número de visitante 6279657

Precio Reportado por los operadores de los Establecimientos de Venta al Público de GNV

Fecha y Hora de Actualización : 16/02/2019 - 21:00

LIMA ▼ LIMA ▼ ANCON ▼ Gas Natural Vehicular ▼

Distrito	Establecimiento	Dirección	Teléfono	Precio de Venta (Soles por metros cúbicos)
ANCON	EMPRESA DE TRANSPORTES Y SERVICIOS VIRGEN DE LA PUERTA S.A.	AV. LA FLORIDA CDRA. 12 MIRAMAR . LAS CONCHITAS	015500397/015500336	1.69
ANCON	ESTACION DE SERVICIOS ANCON S.A.	CARRETERA PANAMERICANA NORTE KM. 44, URB. SAN JOSE, MZ. N LOTE 3	015521953	1.69

Página 1 de 1 <Anterior Página actual: 1 Siguiente> <<Inicio Fin>>

Los precios son reportados por los propios operadores de los Establecimientos a través de la Plataforma Virtual del Osinergmin (PRICE). Si no coinciden con los ofrecidos en los establecimientos, denúncielo ante Osinergmin.

[Versión anterior del Facilito](#)

Fuente: Sistema Facilito Osinergmin, 2019.

**ANEXO C2. PRECIO DE GASOHOL 90 PLUS.****Precio Reportado por los operadores de las Estaciones de Servicio y Grifos**

Número de visitante **6296552**

Precio Reportado por los operadores de las Estaciones de Servicio y Grifos Fecha y Hora de Actualización : 18/02/2019 - 22:00

Distrito	Establecimiento	Dirección	Teléfono	Precio de Venta (soles por galón)
WANCHAQ	REPUESTOS LIMA SOCIEDAD COMERCIAL DE RESPONSABILIDAD LIMITADA	AV. GARCILASO N° 508	084221561	10.79
WANCHAQ	GRIFO GASOL S.A.C.	AV. GARCILASO N° 707	084232911/084232058	10.80
WANCHAQ	SERVICENTRO JAKELINE SOCIEDAD COMERCIAL DE RESPONSABILIDAD LIMITADA	AV. VIA EXPRESA PARQUE INDUSTRIAL LOTE B-6		10.80
WANCHAQ	GRIFO JHP E.I.R.L.	PARQUE INDUSTRIAL LOTE K-3-A	984017090/984115501,084243130	10.80
WANCHAQ	SERVICENTRO AMERICANO S.R.L.	AV. DE LA CULTURA N° 210	084248811	10.88
WANCHAQ	SERVICENTRO LOS SAUCES S.A.C.	PARQUE INDUSTRIAL MZ H LOTES 1 Y 2, AV. VIA EXPRESA	084243505	10.99
WANCHAQ	SERVICENTRO VIRGEN NATIVIDAD S.A.C.	AV. LA REPUBLICA DEL PERU Y AV. AMERICAS LOTE 11-B		11.69
WANCHAQ	COESTI S.A.	PARQUE INDUSTRIAL LOTE A-20	084222970/084221413	11.39
WANCHAQ	INVERSIONES CECO S.A.C.	AV. DE LA CULTURA N° 722 Y AV. MICAELA BASTIDAS N° 139	084241530	11.57
WANCHAQ	GRIFO MARCELO S S.R.L.	AV. HUAYRUROPATA N° 1700	084265444/984110419	11.58
WANCHAQ	GRIFO SAN MARTIN S.A.C	AV. DE LA CULTURA 1620	084221262/9623331	11.59
WANCHAQ	GRIFO LATINO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA	AV. DE LA CULTURA N° 409 ESQ CALLE TACNA	084262094/084438346	11.59
WANCHAQ	LATINO SERVIS S.R.L	AV. HUAYRUROPATA N° 1935	084225296	11.59
WANCHAQ	REPSOL COMERCIAL SAC	AV. INFANCIA N° 551	084224541	11.79

Página 1 de 1 <Anterior Página actual: 1 Siguiente> <<Inicio Fin>>

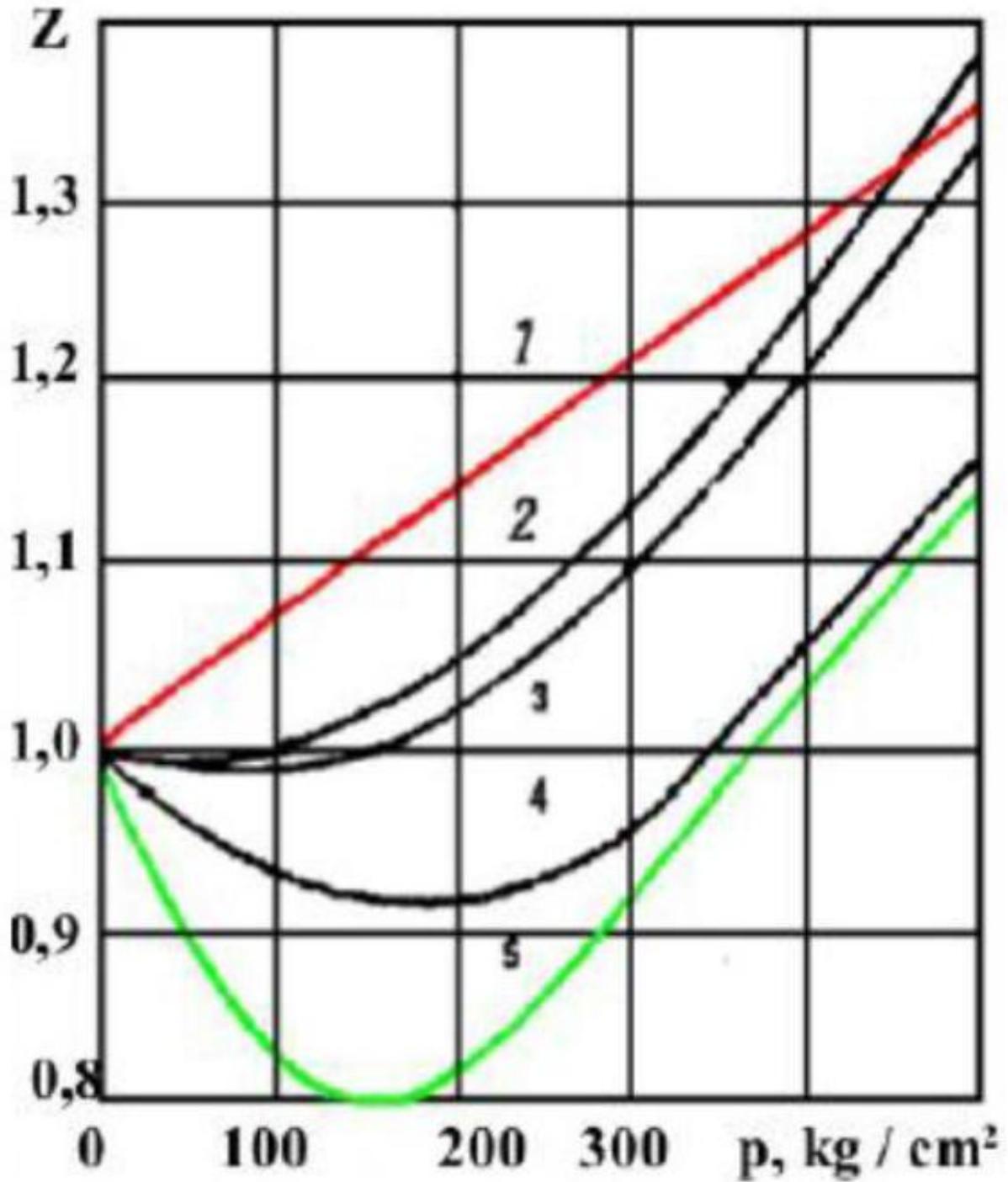
Los precios son reportados por los propios operadores de los Establecimientos a través de la Plataforma Virtual del Oshergmin (PRICE). Si no coinciden con los ofrecidos en los establecimientos, denúncielo ante Oshergmin.

Versión anterior del Facilito

Fuente: Sistema Facilito Oshergmin, 2019.



ANEXO C3. COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD.



Fuente: Ing. Guillermo Lira Cacho, pág. 38, 2011.



ANEXO C4. ENTALPIAS DE FORMACION ESTANDAR (KJ/mol).

Fórmula	Nombre compuesto	ΔH_f°	Fórmula	Nombre compuesto	ΔH_f°
CO (g)	Monóxido de carbono	-110,4	CH ₃ CH ₂ OH (l)	Etanol	-277,7
CO ₂ (g)	Dióxido de carbono	-393,5	HCHO (g)	Formaldehído	-117,2
NO (g)	Monóxido de nitrógeno	90,3	HCOOH (l)	Ácido fórmico o metanoico	-424,7
NO ₂ (g)	Dióxido de nitrógeno	33,2	CH ₃ COOH (l)	Ácido acético	-484,5
N ₂ O ₄ (g)	Tetróxido de dinitrógeno	9,7	CCl ₄ (l)	Tetracloruro de carbono	-138,7
SO ₂ (g)	Dióxido de azufre	-296,9	CH ₃ Cl (g)	Clorometano	-81,9
SO ₃ (g)	Trióxido de azufre	-394,8	CHCl ₃ (l)	Cloroformo	-131,8
C (grafito)	Carbono grafito	0,0	CH ₂ Cl-CH ₃ (g)	Cloroetano	-105,0
C (diamante)	Carbono diamante	1,9	C ₆ H ₁₂ O ₆ (s)	Glucosa	-1274,4
O ₂ (g)	Oxígeno	0,0	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (s)	Sacarosa	-2221,2
O ₃ (g)	Ozono	142,0	CH ₃ CHO (l)	Acetaldehído	-166,4
S (rómbo)	Azufre rómbo	0,0	CH ₃ COCH ₃ (l)	Acetona	-216,7
S (monoclinico)	Azufre monoclinico	0,3	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH (l)	1-Propanol	-255,0
CS ₂ (l)	Disulfuro de carbono	-110,5	CH ₃ CH=CH ₂ (g)	Propeno o propileno	20,4
NH ₃ (g)	Amoníaco (gas)	-46,2	C ₆ H ₅ -CH ₃ (l)	Tolueno	50,0
NH ₃ (l)	Amoníaco (líquido)	-67,2	AgCl (s)	Cloruro de plata	-127,0
PCl ₃ (g)	Tricloruro de fósforo	-306,4	Ca(OH) ₂ (s)	Hidróxido de calcio	-352,0
PCl ₅ (g)	Pentacloruro de fósforo	-398,9	CaCO ₃ (s)	Carbonato cálcico (calcita)	-1207,6
PH ₃ (g)	Fosfina	9,3	CaO (s)	Óxido de calcio	-635,0
AsH ₃ (g)	Arsina	41,0	CaSO ₄ (s)	Sulfato cálcico	-1430,0
H ₃ PO ₄ (s)	Ácido fosfórico	-1281,1	CuO (s)	Óxido de cobre (II)	-155,0
HNO ₃ (l)	Ácido nítrico	-173,2	FeCl ₂ (s)	Cloruro de hierro (II)	-342,7
H ₂ SO ₄ (l)	Ácido sulfúrico	-811,3	FeCl ₃ (s)	Cloruro de hierro (III)	-403,3
HCl (g)	Cloruro de hidrógeno	-92,3	Fe ₂ O ₃ (s)	Óxido de hierro (III)	-829,7
HBr (g)	Bromuro de hidrógeno	-36,2	KCl (s)	Cloruro potásico	-437,1
HI (g)	Yoduro de hidrógeno	25,9	MgCl ₂ (s)	Cloruro de magnesio	-641,8
HCN (l)	Cianuro de hidrógeno	109,0	MgO (s)	Óxido de magnesio	-601,8
H ₂ O (g)	Agua (gas)	-241,6	Mg(OH) ₂ (s)	Hidróxido de magnesio	-924,7
H ₂ O (l)	Agua (líquida)	-285,5	NaOH (s)	Hidróxido sódico	-425,6
H ₂ O (s)	Agua (sólida), hielo	-292,6	NaF (s)	Fluoruro sódico	-571,0
H ₂ S (g)	Sulfuro de hidrógeno	-20,2	NaCl (s)	Cloruro sódico	-410,6
H ₂ Se (g)	Seleniuro de hidrógeno	85,6	NaBr (s)	Bromuro sódico	-359,0
H ₂ O ₂ (l)	Peróxido de hidrógeno	-186,3	NaI (s)	Yoduro sódico	-286,0
CH ₄ (g)	Metano	-74,8	NaCN (s)	Cianuro de sodio	-89,8
C ₂ H ₆ (g)	Etano	-84,4	NaHCO ₃ (s)	Bicarbonato sódico	-945,6
C ₂ H ₄ (g)	Eteno o etileno	52,2	NaNO ₃ (s)	Nitrato sódico	-466,7
C ₂ H ₂ (g)	Etino o acetileno	226,9	NaNO ₂ (s)	Nitrito sódico	-359,0
C ₃ H ₈ (g)	Propano	-103,8	NH ₄ NO ₃ (s)	Nitrato amónico	-366,1
C ₄ H ₁₀ (g)	Butano	-124,7	NH ₄ Cl (s)	Cloruro amónico	-314,4
C ₅ H ₁₂ (l)	Pentano	-173,1	PbO ₂ (s)	Dióxido de plomo	-276,3
C ₆ H ₁₄ (l)	Hexano	-198,7	SiO ₂ (s)	Óxido de silicio (sílice)	-851,0
C ₇ H ₁₆ (l)	Heptano	-187,8	XeF ₄ (s)	Tetrafluoruro de xenón	-284,2
C ₆ H ₆ (l)	Benceno	82,8	XeF ₆ (s)	Hexafluoruro de xenón	-401,3
C ₆ H ₅ -CHO (l)	Benzaldehído	-88,8	ZnO (s)	Óxido de zinc	-347,8
CH ₃ OH (l)	Metanol	-236,7	ZnS (s)	Sulfuro de zinc	-202,7

Fuente: Quimitube.



ANEXO C5. VALORES CRITICOS PARA LA PRUEBA DE TUKEY.

Tabla VI.- Valores críticos para la prueba de Tukey.
 $q_{\alpha}(v_1, v_2)$

v_2 i	α i	v_1									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.05	18.00	29.98	32.82	37.08	40.41	43.12	45.40	47.36	49.07	50.59
	0.01	90.03	135.0	164.3	185.6	202.2	215.8	227.2	237.0	245.6	253.2
2	0.05	6.10	8.33	9.80	10.88	11.74	12.44	13.03	13.54	13.99	14.39
	0.01	14.04	19.02	22.29	24.72	26.63	28.20	29.53	30.68	31.69	32.59
3	0.05	4.50	5.91	6.82	7.50	8.04	8.48	8.85	9.18	9.46	9.72
	0.01	8.26	10.62	12.17	13.33	14.24	15.00	15.64	16.20	16.69	17.13
4	0.05	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.05	7.34	7.60	7.83	8.03
	0.01	6.51	8.12	9.17	9.96	10.58	11.10	11.55	11.93	12.27	12.57
5	0.05	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17
	0.01	5.70	6.97	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	10.48
6	0.05	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65
	0.01	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	9.30
7	0.05	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30
	0.01	4.95	5.92	6.54	7.01	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	8.55
8	0.05	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05
	0.01	4.74	5.63	6.20	6.63	6.96	7.24	7.47	7.68	7.87	8.03
9	0.05	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87
	0.01	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.32	7.49	7.65
10	0.05	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72
	0.01	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	7.36
11	0.05	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61
	0.01	4.39	5.14	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	7.13
12	0.05	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51
	0.01	4.32	5.04	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	6.94
13	0.05	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43
	0.01	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	6.79
14	0.05	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36
	0.01	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	6.66
15	0.05	3.01	3.67	4.08	4.37	4.60	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31
	0.01	4.17	4.83	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	6.55
16	0.05	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26
	0.01	4.13	4.78	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	6.46



v_2 ↓	α ↓	v_1								
		12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.05	51.96	53.20	54.33	55.36	56.32	57.22	58.04	58.83	59.56
	0.01	260.0	266.2	271.8	277.0	281.8	286.3	290.4	294.3	298.0
2	0.05	14.75	15.08	15.38	15.65	15.91	16.14	16.37	16.57	16.77
	0.01	33.40	34.13	34.81	35.43	36.00	36.53	37.03	37.50	37.95
3	0.05	9.95	10.15	10.35	10.53	10.69	10.84	10.98	11.11	11.24
	0.01	17.53	17.89	18.22	18.52	18.81	19.07	19.32	19.55	19.77
4	0.05	8.21	8.37	8.52	8.66	8.79	8.91	9.03	9.13	9.23
	0.01	12.84	13.09	13.32	13.53	13.73	13.91	14.08	14.24	14.40
5	0.05	7.32	7.47	7.60	7.72	7.83	7.93	8.03	8.12	8.21
	0.01	10.70	10.89	11.08	11.24	11.40	11.55	11.68	11.81	11.93
6	0.05	6.79	6.92	7.03	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
	0.01	9.49	9.65	9.81	9.95	10.08	10.21	10.32	10.43	10.54
7	0.05	6.43	6.55	6.66	6.76	6.85	6.94	7.02	7.09	7.17
	0.01	8.71	8.86	9.00	9.12	9.24	9.35	9.46	9.55	9.65
8	0.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
	0.01	8.18	8.31	8.44	8.55	8.66	8.76	8.85	8.94	9.03
9	0.05	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.64
	0.01	7.78	7.91	8.03	8.13	8.23	8.32	8.41	8.49	8.57
10	0.05	5.83	5.93	6.03	6.11	6.20	6.27	6.34	6.40	6.47
	0.01	7.48	7.60	7.71	7.81	7.91	7.99	8.07	8.15	8.22
11	0.05	5.71	5.81	5.90	5.99	6.06	6.14	6.20	6.26	6.33
	0.01	7.25	7.36	7.46	7.56	7.65	7.73	7.81	7.88	7.95
12	0.05	5.62	5.71	5.80	5.88	5.95	6.03	6.09	6.15	6.21
	0.01	7.06	7.17	7.26	7.36	7.44	7.52	7.59	7.66	7.73
13	0.05	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.05	6.11
	0.01	6.90	7.01	7.10	7.19	7.27	7.34	7.42	7.48	7.55
14	0.05	5.46	5.55	5.64	5.72	5.79	5.85	5.92	5.97	6.03
	0.01	6.77	6.87	6.96	7.05	7.12	7.20	7.27	7.33	7.39
15	0.05	5.40	5.49	5.58	5.65	5.72	5.79	5.85	5.90	5.96
	0.01	6.66	6.76	6.84	6.93	7.00	7.07	7.14	7.20	7.26
16	0.05	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.72	5.79	5.84	5.90
	0.01	6.56	6.66	6.74	6.82	6.90	6.97	7.03	7.09	7.15



v_2 ↓	α ↓	v_1									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	0.05	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.71	4.86	4.99	5.11	5.21
	0.01	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38
18	0.05	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17
	0.01	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31
19	0.05	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14
	0.01	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25
20	0.05	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11
	0.01	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19
24	0.05	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01
	0.01	3.96	4.54	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02
30	0.05	2.89	3.49	3.84	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92
	0.01	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85
40	0.05	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82
	0.01	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.27	5.39	5.50	5.60	5.69
60	0.05	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73
	0.01	3.76	4.28	4.60	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	5.53
120	0.05	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.48	4.56	4.64
	0.01	3.70	4.10	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	5.38
∞	0.05	2.77	3.31	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55
	0.01	3.64	4.12	4.40	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	5.23



V ₂ ↓	α ↓	V ₁								
		12	13	14	15	16	17	18	19	20
17	0.05	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
	0.01	6.48	6.57	6.66	6.73	6.80	6.87	6.94	7.00	7.05
18	0.05	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
	0.01	6.41	6.50	6.58	6.65	6.72	6.79	6.85	6.91	6.96
19	0.05	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
	0.01	6.34	6.43	6.51	6.58	6.65	6.72	6.78	6.84	6.89
20	0.05	5.20	5.28	5.36	5.43	5.49	5.55	5.61	5.66	5.71
	0.01	6.29	6.37	6.45	6.52	6.59	6.65	6.71	6.76	6.82
24	0.05	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.54	5.59
	0.01	6.11	6.19	6.26	6.33	6.39	6.45	6.51	6.56	6.61
30	0.05	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
	0.01	5.93	6.01	6.08	6.14	6.20	6.26	6.31	6.36	6.41
40	0.05	4.91	4.98	5.05	5.11	5.16	5.22	5.27	5.31	5.36
	0.01	5.77	5.84	5.90	5.96	6.02	6.07	6.12	6.17	6.21
60	0.05	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.16	5.20	5.24
	0.01	5.60	5.67	5.73	5.79	5.84	5.89	5.93	5.98	6.02
120	0.05	4.72	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.05	5.09	5.13
	0.01	5.44	5.51	5.56	5.61	5.66	5.71	5.75	5.79	5.83
∞	0.05	4.62	4.68	4.74	4.80	4.85	4.89	4.93	4.97	5.01
	0.01	5.29	5.35	5.40	5.45	5.49	5.54	5.57	5.61	5.65

Fuente: Parasitología Chapingo, Mexico.

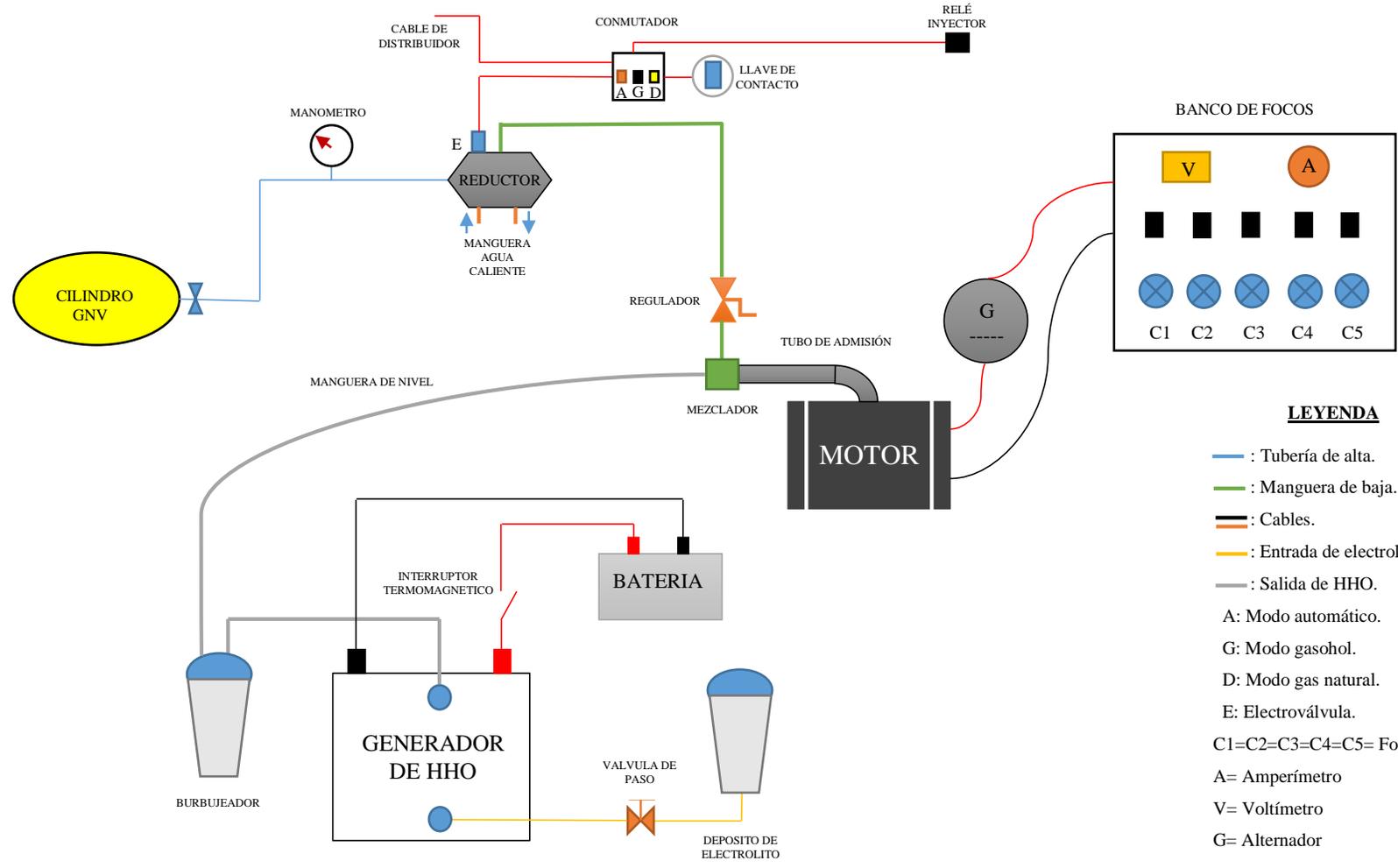


ANEXO C6. COMPOSICION DE GAS NATURAL (CAMISEA).

Parámetros'	Valor
Composición del GN (% en volumen):	
	88,166
- metano, C ₁	10,284
- etano, C ₂	0,535
- propano, C ₃	0,025
- iso-butano+ n-butano, C ₄	0,002
- pentano, C ₅	0,262
- dióxido de carbono	0,000
- oxígeno	0,725

Fuente: Ing. Guillermo Lira Cacho, pág. 11, 2011.

ANEXO C7. ESQUEMA GENERAL.



LEYENDA

- : Tubería de alta.
- : Manguera de baja.
- : Cables.
- : Entrada de electrolito.
- : Salida de HHO.
- A: Modo automático.
- G: Modo gasohol.
- D: Modo gas natural.
- E: Electroválvula.
- C1=C2=C3=C4=C5= Foco
- A= Amperímetro
- V= Voltímetro
- G= Alternador

Fuente: Elaboración Propia.

**ANEXO C8. CERTIFICADO DE CALIBRACION DE ANALIZADOR DE GASES.**

INFORME DE CALIBRACIÓN N°: IC-0392-18

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL SOLICITANTE:

- 1.1 Solicitante: INSTITUTO DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICO PÚBLICO TÚPAC AMARU
1.2 Dirección: AV. CUSCO S/N SAN SEBASTIAN CUSCO - SAN SEBASTIAN
1.3 Solicitud de Servicios (N°): SS-0588-18

2. INFORMACIÓN DEL EQUIPO/INSTRUMENTO CALIBRADO:

- 2.1 Equipo/Instrumento: Analizador de Gases
2.2 Fabricante: Pierburg Instruments
2.3 Modelo: HGA 400
2.4 Número de Serie: 621
2.5 Clase de Exactitud: Clase 1

3. INSPECCIÓN DEL EQUIPO/INSTRUMENTO:

Comprobación de las Componentes	Resultado	
	Aprobada	Desaprobada
Sonda de medición	x	
Sistema de RPM	x	
Prueba de impresora	-	-
Sonda de temperatura de aceite	x	

Comprobación del Funcionamiento	Resultado	
	Aprobada	Desaprobada
Vacio de entrada	x	
Prueba de estanqueidad	x	
Test de Residuos HC	x	
Respuesta de canal CO, CO2, HC (< 15 s)	x	
Valor de O2 menor a 0.1%val en 60 seg	x	
Etiqueta anterior de calibración	x	

4. OBSERVACIONES:

Equipo apto para su funcionamiento.

Fecha
12/06/2018

Responsable del Laboratorio de Calibración

ESTEBAN GROSS



CC-0392-18

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN:

La calibración se ha realizado por comparación directa con los patrones utilizados, determinándose el error de indicación del analizador de gases, según la Norma Alemana GM-P 18.10.2008 y el manual del fabricante.

5. CONDICIONES DE CALIBRACIÓN:

Temperatura [°C]	-
Humedad Relativa [%]	-
Presión Atmosférica [mBar]	-

6. PATRONES UTILIZADOS:

Patrones utilizados	Certificado de análisis	Trazabilidad
Patrón primario con incertidumbre de hasta 1%.	No. CC468950	Método gravimétrico. Pasos patrones con trazabilidad al NIST

7. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN:

Componente [unidad]	Valor Patrón	Lectura Promedio	Error		Incertidumbre	EMP Clase I	
			Absoluto	Relativo [%]		Absoluto	Relativo [%]
CO [% Vol]	3.51	3.50	0.01	0.23	0.04	0.06	5
CO ₂ [% Vol]	13.99	14.00	0.01	0.07	0.15	0.50	5
Propano [ppm]	995	989	6	0.60	9.96	12	5

PEP (2002 $k=2$) = 0.498

8 NOTAS:

Los gases de referencia fueron suministrados a la sonda a presión ambiente (con una desviación máxima de 8 hPa).

E.M.P.: Error máxima permisible según Norma Alemana GM-P 18.10.2008.

La incertidumbre de calibración corresponde a un factor cobertura $k=2$ y un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Con fines de identificación se ha colocado en el equipo una etiqueta autoadhesiva de color gris plata.

El instrumento reporta lecturas en propano como componente de HC.



[Handwritten signature]



En Calles 1055 y Surpunta
Tel: 051-4444777 - 051-4444222277
servicio@calibra.com.pe - www.calibra.com.pe

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N°: CC-0392-18

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL SOLICITANTE:

1.1. Solicitante: INSTITUTO DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICO PÚBLICO TUPAC AMARU
1.2. RUC (N°): 20358681949
1.3. Dirección: AV. CUSCO S/N SAN SEBASTIAN CUSCO - SAN SEBASTIAN
1.4. Teléfono: 953758650
1.5. Correo Electrónico: adm.iesp@hotmail.com
1.6. Solicitud de Servicios (N°): SS-0588-18

2. INFORMACIÓN DEL EQUIPO/INSTRUMENTO CALIBRADO:

2.1. Equipo/Instrumento: Analizador de Gases
2.2. Fabricante: Pierburg Instruments
2.3. Modelo: HGA 400
2.4. Número de Serie: 621
2.5. Clase de Exactitud: Clase 1
2.6. Rango de la Escala: CO: 0 a 10% vol; CO₂: 0 a 20% vol; HC: 0 a 20000 ppm
2.7. División de la Escala: CO: 0,01% vol; CO₂: 0,1% vol; HC: 1 ppm vol C₃H₈

3. LUGAR Y FECHA DE CALIBRACION:

3.1. Lugar: IESTP TUPAC AMARU, San Sebastian, Cusco
3.2. Fecha: 4 de Junio de 2018

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que miden las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Los resultados consignados en el presente Certificado de Calibración se refieren únicamente al objeto sometido a calibración, al momento y condiciones en las que se realizaron las mediciones. CALBRA S.A.C. no se responsabiliza por los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los objetos calibrados o del presente Certificado de Calibración.

Este Certificado de Calibración cumple con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP - ISO/IEC 17025 (homologación nacional de la Norma Internacional ISO/IEC 17025 "Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración").

Este certificado de calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de CALBRA S.A.C. Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Los empujados al presente documento no efectuados por CALBRA S.A.C., constituyen un delito contra la fe pública y el infractor es sujeto de sanciones civiles y penales reguladas por dispositivos legales vigentes.

En referencia al OS-N° 009-2012-MINAM, se recomienda al usuario recalibrar sus equipos/instrumentos cada 6 meses.

Fecha	Responsable del Laboratorio de Calibración	Metrólogo
12/06/2018	 ESTEBAN GROSS	 DONATO ESPARTA

Fuente: Centro de Inspección Vehicular Tupac Amaru.

**ANEXO C9. PROTOCOLO DE PRUEBA – PRODUCTOS DE LA COMBUSTION.**

		PROTOCOLO DE PRUEBA - EMISIONES DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION					
I. Datos Generales							
Institución:		Ejecutor:					
Escuela:		Ubicación:					
Prueba:		Fecha:					
II. Datos Técnicos							
Motor:		Marca:					
N° Serie:		Combustible:					
III. Equipos e Instrumentos							
Equipos		Descripción			Observación		
1.-							
2.-							
3.-							
Instrumentos		Descripción			Observación		
1.-							
2.-							
3.-							
IV. Resultados Obtenidos							
Emisiones de gases	RPM	CO (% vol)	HC (ppm)	CO2 (% vol)	O2 (% vol)	λ	
Generador de hidrogeno	T° gas HHO (°C)	T° electrolito (°C)	Corriente (A)	Voltaje (V)		Tiempo (min)	
Tubo de admisión (Anemómetro)	RPM			Velocidad de ingreso de aire (m/s)			
Manómetro de GNV	RPM		Presión inicial (bar)	Presión final (bar)	Tiempo (min)		
Consumo de combustible	Combustible	RPM		Volumen (l)		Tiempo (min)	
V. Observaciones Detectadas							
Item	Observación					Calificación	

Nota: Calificación, A: Bueno, B: Regular y C: Malo

Fuente: Elaboración Propia.

**ANEXO C10. PROTOCOLO DE PRUEBA – POTENCIA EN RALENTI.**

		PROTOCOLO DE PRUEBA - POTENCIA EN RALENTI					
I. Datos Generales							
Institución:		Ejecutor:					
Escuela:		Ubicación:					
Prueba:		Fecha:					
II. Datos Técnicos							
Motor:		Marca:					
Nº Serie:		Combustible:					
III. Instrumentos							
Instrumentos	Descripción			Observación			
1.-							
2.-							
3.-							
IV. Resultados Obtenidos							
Potencia	RPM inicio	RPM final	Voltaje Sistema (V)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Nº Focos Encendidos	
V. Observaciones Detectadas							
Item	Observación					Calificación	

Fuente: Elaboración Propia.