

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Diagnóstico, adaptación y puesta en marcha de un grupo electrógeno con los combustibles gasolina y Gas Natural comprimido (GNC), para el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA)

José Daniel Caicedo Manrique

Diego Andrés Oviedo Tapias

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

PhD. Ingeniería en Termo fluidos aplicados a Motores Térmicos

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones recibidas.

A mis padres por su esfuerzo, dedicación, paciencia y amor incondicional que me brindaron para salir adelante.

A mis hermanos por el apoyo, cariño y confianza que me han dado.

José Daniel Caicedo Manrique

Dedicatoria

A mis padres que gracias a su amor y esfuerzo he salido adelante.

A toda mi familia y amigos por su apoyo y acompañamiento a lo largo de toda mi vida.

Diego Andrés Oviedo Tapias

Agradecimientos

A mis padres por la formación que me inculcaron con cariño.

A mis hermanos por sus consejos, apoyo y todos los momentos compartidos.

A todos los docentes que hicieron parte de mi formación en especial al director del proyecto

Jorge Luis Chacón Velasco.

A la comunidad educativa de la Universidad Industrial de Santander.

A mi compañero por su esfuerzo y dedicación en el desarrollo del proyecto.

A todos mis tíos por su cariño y sus sabios consejos.

José Daniel Caicedo Manrique

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme de manera incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

A mi director Jorge Luis Chacón Velasco por su acompañamiento y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme culminar mi pregrado como estudiante de esta institución.

A los ingenieros Franklin Julián Patiño y Dayal Castro por su significativa ayuda en momentos claves de este proyecto.

A mi compañero de proyecto por su esfuerzo y dedicación.

Diego Andrés Oviedo Tapias

Tabla de Contenido

Introducción	16
Objetivos	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Justificación	19
3. Marco Teórico.....	20
3.1 Antecedentes.....	20
3.1.1 Evaluación de desempeño de un motor de combustión interna otto usando como combustible biometano presurizado en un generador eléctrico (Apaza 2021).....	20
3.1.2 Análisis de la potencia generada y de los gases de escape de un grupo electrógeno usando como combustible una mezcla de gasolina-biogás (Torres, 2019).....	21
3.1.3 Adaptación y evaluación del desempeño de un generador eléctrico utilizando biogás como combustible (Patiño 2021).	22
3.1.4 Diagnóstico, puesta en marcha e implementación de las practicas experimentales de un grupo electrógeno del laboratorio de máquinas térmicas alternativas (Mateus & Quiros, 2012)	23
3.2 Referentes teóricos.....	24
3.2.1 Grupo electrógeno.....	25
3.2.2 Características del grupo electrógeno del LMTA.....	26
3.2.3 Características de los Combustibles.....	27
4. Mantenimiento a partir de una inspección y diagnóstico.....	28

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

4.1	Mantenimiento recomendado por el fabricante	29
4.1.1	Recomendaciones para el generador.....	29
4.1.2	Recomendaciones para el motor	31
5.	Diseño del mezclador.....	35
5.1	Método de Mitzlaff	37
5.2	Método de Agudelo y Mejía	37
6.	Modelado y construcción del dispositivo	41
6.1	Implementación y adaptación del mezclador.....	45
7.	Análisis teórico de los combustibles.....	49
7.1	Análisis estequiométrico de la combustión.....	50
7.1.1	Balance de materia.....	50
7.1.2	Parámetros de combustión	51
7.1.2.1	Relación aire-combustible teórica ideal.....	51
7.1.2.2	Factor de aire de la combustión λ (Lambda).	51
7.2	Combustión teórica de la gasolina	52
7.3	Combustión teórica del gas natural.....	53
8.	Pruebas de desempeño y emisiones del grupo electrógeno con los combustibles....	56
8.1	Emisiones de escape	61
8.2	Consumo específico de combustible y potencia generada.....	66
9.	Protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno	72
9.1	Arranque del grupo electrógeno.....	75
9.2	Apagado del grupo electrógeno	80
9.3	Protección de circuitos	81

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

9.4	Servicio poco frecuente.....	82
9.5	Almacenamiento a largo plazo.....	82
	Conclusiones.....	85
	Recomendaciones	87
	Referencias bibliográficas.....	88

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Descripción del motor</i>	26
Tabla 2 <i>Descripción del generador</i>	27
Tabla 3 <i>Características fisicoquímicas del gas natural, el GLP y la gasolina</i>	27
Tabla 4 <i>Instrucciones de mantenimiento por horas</i>	31
Tabla 5 <i>Operaciones de mantenimiento en el grupo electrógeno</i>	33
Tabla 6 <i>Parámetros de entrada utilizados en el modelo de Agudelo y Mejía para el diseño del Venturi</i>	40
Tabla 7 <i>Valores obtenidos mediante el método Agudelo</i>	41
Tabla 8 <i>Lista de componentes del banco de pruebas</i>	57
Tabla 9 <i>Composición de los gases patrón</i>	59
Tabla 10 <i>Porcentaje de error con respecto a los gases patrón</i>	59
Tabla 11 <i>Resultados gases de escape utilizando gasolina como combustible</i>	61
Tabla 12 <i>Resultados gases de escape utilizando gas natural como combustible</i>	62
Tabla 13 <i>Resultados potencia generada y consumo de combustible utilizando gas natural como combustible</i>	67
Tabla 14 <i>Resultados potencia generada y consumo de combustible utilizando gasolina</i>	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Componentes principales de un grupo</i>	25
Figura 2 <i>Revisión de las escobillas</i>	29
Figura 3 <i>Excitación del generador.</i>	30
Figura 4 <i>Cambio del filtro de aceite</i>	32
Figura 5 <i>Dosificador de gas ANSI</i>	33
Figura 6 <i>Elementos de la instalación eléctrica</i>	34
Figura 7 <i>Exosto y múltiple de escape</i>	34
Figura 8 <i>Filtro de gasolina</i>	35
Figura 9 <i>Vista transversal de un tubo tipo Venturi</i>	36
Figura 10 <i>Plano del Mezclador Venturi</i>	43
Figura 11 <i>Boquilla estandarizada de radio largo para instrumentos de medición de fluidos</i>	44
Figura 12 <i>Impresión 3D del Mezclador Venturi</i>	45
Figura 13 <i>Grupo electrógeno antes y después</i>	46
Figura 14 <i>Instalación para el GNC</i>	46
Figura 15 <i>Conexión eléctrica para conmutar de gasolina a GNC</i>	47
Figura 16 <i>Partes del carburador del grupo electrógeno</i>	48
Figura 17 <i>Carburador del grupo electrógeno</i>	49
Figura 18 <i>Calculo fracciones molares para gasolina</i>	53
Figura 19 <i>Calculo fracciones molares para gas natural</i>	55
Figura 20 <i>Esquema y componentes del banco de pruebas</i>	56

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 21 <i>Montaje para las pruebas de gases de escape.</i>	57
Figura 22 <i>Calibración con los gases patrón.</i>	58
Figura 23 <i>Registro de calibracion del analizador de gases</i>	60
Figura 24 <i>Monóxido de carbono (%V) vs Carga con gasolina</i>	63
Figura 25 <i>Monóxido de carbono (%V) vs Carga con gas natural.</i>	63
Figura 26 <i>Dióxido de carbono CO2 vs Carga</i>	64
Figura 27 <i>Hidrocarburos no quemados (HC) vs Carga</i>	65
Figura 28 <i>Potencia generada (W) vs Carga</i>	68
Figura 29 <i>Consumo específico de combustible (kg/kwh) vs Carga con gasolina.</i>	69
Figura 30 <i>Consumo específico de combustible (m³/kwh) vs Carga con gas natural</i>	70
Figura 31 <i>Eficiencia total (%) vs Carga</i>	71
Figura 32 <i>Elementos de seguridad.</i>	73
Figura 33 <i>Interruptores para los equipos de extracción de gases del LMTA.</i>	75
Figura 34 <i>Revisión del nivel de aceite y combustible.</i>	76
Figura 35 <i>Panel de control del grupo electrógeno</i>	77
Figura 36 <i>Llaves que dan paso al combustible.</i>	77
Figura 37 <i>Electroválvula de gasolina activada</i>	78
Figura 38 <i>Encendido del motor</i>	78
Figura 39 <i>Electroválvula de gas activada</i>	79
Figura 40 <i>Conexión del tablero de consumo</i>	79
Figura 41 <i>Tablero de control carga y panel del generador.</i>	80
Figura 42 <i>Apagado del grupo electrógeno</i>	80
Figura 43 <i>Disyuntores de seguridad del generador</i>	81

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 44 <i>Nivel superior de aceite</i>	82
Figura 45 <i>Drenaje de combustible estancado</i>	83
Figura 46 <i>Desmante de bujía</i>	83

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Anexo A. Desarrollo del modelo matemático para el dimensionamiento del mezclador tipo Venturi

Anexo B. Ficha técnica material de impresión 3D

Anexo C. Factura de compra carburador genérico

Anexo D. Campos de medición del analizador de gases Brainbee AGS-690

Anexo E. Cartilla de las prácticas de laboratorio del grupo electrógeno Powermate Coleman 7000

Resumen

Título: Diagnóstico, adaptación y puesta en marcha de un grupo electrógeno con los combustibles gasolina y Gas Natural comprimido (GNC), para el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA)

Autor: José Daniel Caicedo Manrique y Diego Andrés Oviedo Tapias

Palabras Clave: Grupo electrógeno, Mezclador Venturi, Motor de combustión interna, Generador, Gas Natural, Gasolina, Potencia Generada.

Descripción: En el presente trabajo se describe la adaptación y puesta en marcha de un grupo electrógeno del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, para el funcionamiento con combustibles gaseosos. Se realizó un diagnóstico, las operaciones de mantenimiento. Se diseñó e implementó un mezclador tipo Venturi, dimensionado según la metodología de John R. Agudelo y Ricardo Mejía., impreso en nailon con un 20% en masa de fibra de carbono. Se desarrollaron prácticas experimentales con el grupo electrógeno que está compuesto por un motor de combustión interna Briggs & Stratton de 18 HP y un generador Powermate de 7000W, con el fin de obtener los parámetros que indican el desempeño, rendimiento, eficiencia y proporción de gases de escape para realizar un análisis comparativo entre los combustibles implementados. Al desarrollar las prácticas se observó un aumento de potencia generada trabajando con gasolina para cargas de 5000W aproximadamente, respecto a los valores obtenidos con gas natural. Los gases de escape emitidos al trabajar con gas natural muestran valores muy bajos de CO y HC , hecho que resulta muy positivo a nivel ambiental. Para facilitar las prácticas con el grupo electrógeno se diseñó e implementó una cartilla que contiene los protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno y las prácticas de: Identificación del grupo electrógeno, Generación de potencia eléctrica por medio del grupo electrógeno utilizando gasolina y gas natural como combustibles y Análisis de los gases de escape del grupo electrógeno utilizando gasolina y gas natural como combustible.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Ph.D. Ingeniería en Termo fluidos aplicados a Motores Térmicos

Abstract

Title: Diagnosis, adaptation and start-up of a generator set with gasoline and compressed natural gas (CNG) for the Laboratory of Alternative Thermal Machines (LATM) *

Author: José Daniel Caicedo Manrique and Diego Andrés Oviedo Tapias **

Keywords: Generator Set, Venturi Mixer, Internal Combustion Engine, Generator, Natural Gas, Gasoline, Generated Power.

Description: This work describes the adaptation and start-up of a generator set of the Alternative Thermal Machines Laboratory of the School of Mechanical Engineering of the Universidad Industrial de Santander, for operation with gaseous fuels. A diagnosis of maintenance operations was carried out. A Venturi type mixer was designed and implemented, sized according to the methodology of John R. Agudelo and Ricardo Mejía, printed in nylon with 20% mass of carbon fiber. Experimental practices were developed with the generator set which is composed of an 18 HP Briggs & Stratton internal combustion engine and a 7000W Powermate generator, in order to obtain the parameters that indicate the performance, yield, efficiency and proportion of exhaust gases to perform a comparative analysis between the implemented fuels. When developing the practices, it was observed an increase of generated power working with gasoline for loads of approximately 5000W, with respect to the values obtained with natural gas. The exhaust gases emitted when working with natural gas show very low values of CO and HC, which is very positive for the environment. To facilitate the practices with the genset, a booklet was designed and implemented containing the protocols of prevention and operation of the genset and the practices of: Identification of the genset, Generation of electric power by means of the genset using gasoline and natural gas as fuels and analysis of the genset exhaust gases using gasoline and natural gas as fuel.

* Research Project

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Ph.D. Ingeniería en Termo fluidos aplicados a Motores Térmicos

Introducción

La electricidad además de un servicio es una necesidad para el desarrollo de la sociedad actual, al facilitar una gran cantidad de actividades en la cotidianidad de las personas. Actualmente, se puede considerar imposible sobrevivir sin electricidad, ya que está presente en todo lo que nos rodea: fábricas, oficinas, hospitales, centros de emergencia, entretenimiento, iluminación, refrigeración, labores del hogar, etc. Por eso es de gran importancia contar con grupos electrógenos como fuente de respaldo para el abastecimiento de la electricidad, en casos de emergencia donde se corte el suministro, así como en lugares que no cuentan con conexión a la red eléctrica (Quezada, 2013).

La mayoría de estos dispositivos trabajan con gasolina o diésel, combustibles con un óptimo rendimiento, que producen emisiones bastantes contaminantes para el medio ambiente. Por ende, cada vez se prioriza más la diversificación de la canasta energética a nivel nacional con combustibles alternativos en el caso del Gas Natural Vehicular y el Gas Licuado del Petróleo (GLP). Según el Plan Energético Nacional 2020-2050, elaborado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el 42% del gasto energético nacional está constituido únicamente por

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

diésel y gasolina. Por otra parte, combustibles como el GLP y GNV solo constituyen el 2% y 16% respectivamente (Asociación Colombiana del GLP GASNOVA, 2021).

Por lo anterior, las indagaciones en materia de grupos electrógenos son esenciales en la actualidad y, en consecuencia, esta investigación busca profundizar en estos desarrollos pues además de posibilitar soluciones en la sociedad, la alta aplicabilidad de estos equipos es un gran aporte para la formación de los estudiantes de los cursos de termodinámica, combustión industrial y máquinas térmicas alternativas de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander, contar con un grupo electrógeno para que conozcan su funcionamiento y las mejoras que se le pueden implementar en busca de un beneficio tanto ambiental como económico, o a favor de los combustibles que se dispongan. Para contribuir con lo anterior, se propone adaptar el equipo electrógeno “Coleman Powermate 7000 Comercial Electric Generator” del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) para el funcionamiento con gasolina y GNC, en donde se implementará un mezclador de gases conectado al carburador y a la admisión de aire del motor del grupo electrógeno, obteniendo una correcta mezcla de gases en el proceso de combustión.

Objetivos

1.1 Objetivo General

Acondicionar un grupo electrógeno del laboratorio de máquinas térmicas alternativas LMTA, para pruebas de desempeño, rendimiento y emisiones utilizando combustibles tales como gasolina, y GNC (gas natural comprimido).

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un dosificador de aire-combustible, para el funcionamiento del grupo electrógeno con combustibles gaseosos como: gas natural comprimido (GNC), gas licuado del petróleo (GLP), biogás entre otros.
- Evaluar el comportamiento del grupo electrógeno utilizando los combustibles gasolina y GNC, teniendo en cuenta el consumo de combustible, potencia generada y

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

observar el porcentaje de los gases de escape hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂).

- Implementar la guía de protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno para el desarrollo de las prácticas del laboratorio de MTA.

2. Justificación

El LMTA, de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con grupo electrógeno compuesto por un motor *Briggs Stratton* de 18 Hp con un generador *Powermate* de 7000 W, el cual se adaptará para funcionar con los combustible GNC y Gasolina, herramientas que pueden volver más dinámicas las clases de termodinámica, combustión industrial y máquinas térmicas alternativas, de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander, ya que los estudiantes se podrían capacitar con este banco de trabajo en el estudio del funcionamiento de dichos equipos con diferentes alternativas de combustibles. Esto permitiría hacer comprensión sobre la comparación del desempeño y los gases de escape del motor con los combustibles implementados. Actualmente, es muy importante realizar estas comparaciones, ya que con ellas se puede contribuir de manera positiva al medio ambiente, pues hay que tener en cuenta que las reservas de petróleo son limitadas y que es necesario conocer que en los motores de combustión interna pueden operar con combustibles gaseosos, además de los implementados como el GLP y el biogás, producto de la biodegradación de la materia orgánica en los biodigestores. En este

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

sentido, es fundamental que se profundice en indagaciones en las que , se determine qué equipos de combustión interna, en este caso el grupo electrógeno, se encuentran en condiciones óptimas de operación de manera que sus emisiones estén dentro de lo reglamentado por los entes gubernamentales, además de analizar cuál es el combustible que favorece los requerimientos de operación básicos.

3. Marco Teórico

A continuación, se presentan los trabajos de grado y los conceptos teóricos referentes para el desarrollo del proyecto

3.1 Antecedentes

A continuación, se presentan algunos trabajos de investigación que sirven de referentes teóricos para el desarrollo del proyecto.

3.1.1 Evaluación de desempeño de un motor de combustión interna otto usando como combustible biometano presurizado en un generador eléctrico (Apaza, 2021)

En esta tesis se evaluó el desempeño de un motor de combustión interna otto, usando como combustible biometano presurizado a 200bar en un generador eléctrico de 7.5Kkw, al cual se le implementó un kit de conversión de gasolina a gas natural vehicular GNV para realizar las diferentes evaluaciones al motor y así obtener los resultados del desempeño por medio del uso de

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

instrumentos como: un analizador de gases, que mide las emisiones de los gases de escape del motor usando gasolina y biometano como combustible; una balanza y un flujómetro, para la medición del combustible. Adicionalmente, se construyó un módulo con focos para la medición del consumo y la potencia generada por el motor y, por medio de un termómetro infrarrojo, se recolectó información para evaluar el desempeño del motor. En esta investigación se concluyó que el biometano es menos potente que el GLP y la gasolina respectivamente, lo cual se puede mejorar aumentando la eficiencia a la hora de purificar el biometano, trabajando en esta investigación con un biometano del 75.5% CH₄, con el que se redujeron las emisiones comparadas con las emisiones del GLP y la gasolina, donde el biometano es un 62% más económico que la gasolina y un 45% más económico que el GLP. Adicionalmente, se evidenció un mayor consumo de biometano en el generador respecto a los otros combustibles debido a la carga demandada por tener un poder calorífico menor que el de la gasolina y el GLP. Esta tesis puede ser tomada como una guía a la hora de adaptar el motor para el consumo de combustibles gaseosos. Adicionalmente, compara los carburantes con su potencia, eficiencia, consumo específico para el análisis de los gases de escape de los combustibles utilizados.

3.1.2 Análisis de la potencia generada y de los gases de escape de un grupo electrógeno usando como combustible una mezcla de gasolina-biogás (Gutierrez, 2019)

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo realizar el análisis de la potencia generada y de los gases de escape de un grupo electrógeno, usando como combustible una mezcla de gasolina-biogás, para contribuir con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica en el desarrollo social en zonas rurales, con tecnologías que permitan la flexibilidad de producir energía eléctrica y mecánica con diferentes combustibles.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Para el desarrollo del proyecto de investigación, se realizaron pruebas experimentales con un grupo electrógeno de encendido por chispa, utilizando como combustible gasolina, biogás, y una mezcla de estos en tres diferentes proporciones a condiciones ambientales. Los resultados obtenidos mostraron que la potencia generada al mezclar gasolina y biogás es similar al caso en que se utiliza como combustible solamente gasolina. Se observó una disminución del 73.6% en la concentración de monóxido de carbono (CO) y un 71,2% de Hidrocarburos no quemados (HC). Lo anterior es un hallazgo importante que contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero como Metano (CH₄) y CO.

De igual forma, la investigación muestra cómo se mejora el proceso de combustión alcanzando una eficiencia de 16,5% y la reducción de los gases efecto invernadero es significativa con respecto a utilizar gasolina, generando un gran impacto social y ambiental sin realizar grandes modificaciones a los equipos que utilizan combustibles fósiles.

Este proyecto de investigación contribuye como una guía a la hora de realizar las pruebas en el grupo electrógeno determinando los parámetros y variables necesarios para obtener el desempeño, rendimiento y proporción de los gases de escape.

3.1.3 Adaptación y evaluación del desempeño de un generador eléctrico utilizando biogás como combustible (Patiño, 2021).

El presente trabajo de investigación a nivel de maestría tuvo como objetivo adaptar un moto generador eléctrico de encendido por chispa utilizando biogás como combustible y evaluar su desempeño y las emisiones generadas en el proceso de combustión.

A fin de cumplir con el objetivo del proyecto se realizó la adaptación de un motor de encendido por chispa utilizando un mezclador tipo Venturi dimensionado, según la metodología de Von Miztlaff. Se desarrollaron pruebas experimentales que permitieron generar una línea base

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

para los parámetros de desempeño del motor, consumo y potencia desarrollada. La optimización se realizó utilizando el software de dinámica de fluidos computacional ANSYS FLUENT y la técnica estadística box-Benken, con el fin de encontrar una combinación de parámetros geométricos del mezclador (área de garganta Venturi, área de entrada de biogás y número de orificios de entrada) que permitiera mejorar la respuesta en cuanto a la relación aire-combustible, la caída de presión generada y la calidad de la mezcla de la corriente de aire y el biogás.

El uso de la tecnología de impresión 3D permitió la construcción de los modelos CAD de los mezcladores básicos y optimizados para sus pruebas operativas, las cuales fueron desarrolladas utilizando gasolina y biogás como combustibles para el motor-generator. Además, se utilizó un carburador comercial LPG-GN para establecer la línea base de comparación del motor-generator alimentado por un combustible gaseoso. Dichos procesos se desarrollaron en un banco de pruebas diseñado y construido durante el presente trabajo de investigación utilizando elementos de registro y adquisición de datos de fuentes abiertas.

Este proyecto de investigación es de gran aporte ya que presenta la implementación del efecto Venturi para el suministro de diversos tipos de gas a motores de combustión interna, utilizando metodologías de diseño como la descrita por Miztlaff definiendo de esta manera parámetros geométricos de un mezclador de aire-combustible gaseoso.

3.1.4 Diagnóstico, puesta en marcha e implementación de las practicas experimentales de un grupo electrógeno del laboratorio de máquinas térmicas alternativas (Mateus & Quiros, 2012)

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo poner al servicio de los estudiantes de ingeniería mecánica un grupo electrógeno como banco de pruebas experimentales ubicado en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas, además de implementar las respectivas guías de

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

laboratorio. El trabajo de investigación se basó en la realización de tres fases fundamentales definidas como:

- Descripción del banco del grupo electrógeno en la cual se muestran las principales características de los componentes y sistemas del grupo electrógeno.
- Diagnóstico y mantenimiento del grupo electrógeno, se realizó una inspección detallada del estado de todos los componentes del generador con el fin de determinar qué piezas o sistemas requerían de una reparación, ajuste, limpieza, lubricación o cambio parcial o total.
- Implementación y desarrollo de las guías para prácticas de laboratorio, se desarrollaron los respectivos protocolos para que los estudiantes bajo un procedimiento práctico y analítico puedan realizar las diferentes prácticas en el banco de laboratorio.

El presente trabajo de investigación es de gran aporte debido a que muestra información descriptiva de cada uno de los sistemas y componentes del grupo electrógeno que actualmente se encuentran en el laboratorio de máquinas alternativas además de mencionar el funcionamiento y parámetros operativos.

3.2 Referentes teóricos

A continuación, se presentan conceptos teóricos que se deben tener en cuenta para el desarrollo del proyecto.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

3.2.1 Grupo electrógeno

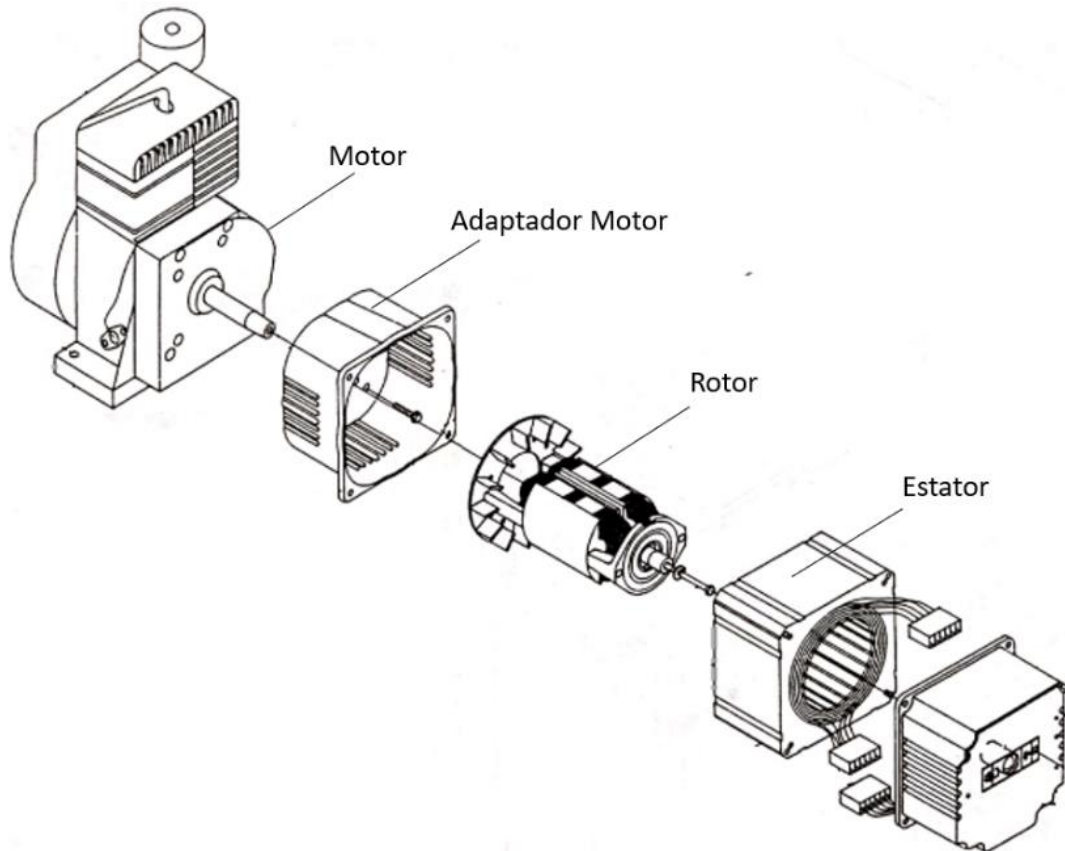
El grupo electrógeno es un dispositivo compuesto por un motor Diésel, gas o gasolina y un alternador, diseñado para mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos denominados polos, que pueden ser terminales o bornes. En el grupo electrógeno se transforma la energía mecánica producida por el motor en energía eléctrica. Esta transformación se logra gracias a la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos ubicados sobre el estátor al producirse mecánicamente un movimiento relativo entre el campo y los conductores.

El sistema de un generador eléctrico está basado en la ley de Faraday, la cual establece que para generar una corriente eléctrica debe existir un movimiento entre el campo magnético y el conductor, siendo el voltaje inducido directamente proporcional a la rapidez en la que cambia en el tiempo el flujo magnético. Al conectar el estátor a una corriente eléctrica continua se obtiene un cambio en el flujo magnético que interactúa con los polos de los imanes del estator, lo que ocasiona que el rotor gire sobre sí mismo para producir una fuerza automotriz con la capacidad de transformarse en energía eléctrica (De Maquinas y Herramientas , s.f.).

Figura 1

Componentes principales de un grupo

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS



Nota. Adaptado de *Coleman Powermate Generator Operator's Manual* (pp. 17-18) del grupo electrógeno 7000 Comercial Electric.

3.2.2 Características del grupo electrógeno del LMTA

El grupo electrógeno del LMTA está compuesto por un motor Briggs & Stratton de 18HP descrito en la tabla 1 y un generador Coleman Powermate de 7000 Watts descrito en la tabla 2.

Tabla 1

Descripción del motor

Parámetro	Descripción
Cilindros	2 en V
Serie-Modelo	422400 DE 18 hp TWIN II
Desplazamiento	42.33 in ³ (694 cc)

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Carrera	2 9/32 in (57,96 mm)
Diámetro del pistón	3 7/16 in (87,31 mm)
Torque máximo	28.6 lb*pie a 2600 rpm.
Número de tiempos	4 T
Ignición	Por chispa
Carburador	Chorro de flujo y de doble cuerpo

Tabla 2

Descripción del generador

Parámetro	Descripción
Potencia nominal	7000 watt
Voltaje	120/240 Voltios
Corriente	29.2/58.8 Amperios
Frecuencia	60 Hertz
RPM	3600
Factor de Potencia	1
Máxima temperatura ambiente	40°C

3.2.3 Características de los Combustibles

Los combustibles son materiales sólidos, líquidos, o gaseosos, los cuales tienen la capacidad de liberar energía cuando se cambia o se transforma su estructura química para liberar su energía potencial a una forma utilizable. En la tabla 3 se encuentra la composición y propiedades de combustibles con los que podrá operar el grupo electrógeno.

Tabla 3

Características fisicoquímicas del gas natural, el GLP y la gasolina

Propiedad	Gas natural	GLP	Gasolina
------------------	--------------------	------------	-----------------

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Composición	90% Metano	60% Propano 40% Butano	50 % Aromáticos (Tolueno y xilenos) 50% Olefinas (isobuteno, hexenos)
Fórmula química	CH ₄	C ₄ H ₁₀ C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₇
Gravedad específica	0,6	2,05 1,56	0,71-0,77
Poder calorífico	9200 kcal/m ³	22244 kcal/m ³	11.867 kcal/Kg
Presión de suministro	21 mbar	50mbar	Atmosférica
Estado físico	Gaseoso sin límite de compresión Liquido a - 160°C y a presión atmosférica	Líquido a 20°C con presión manométrica de 2.5 bar	Líquido incompresible
Color/olor	Incoloro/Inodoro	Incoloro/Inodoro	verde-rojo/inodoro

Nota. Adaptado de *El gas natural y sus diferencias con el GLP Osinergmin* (p, 2).

4. Mantenimiento a partir de una inspección y diagnóstico

El presente apartado contiene los procesos de inspección y mantenimiento. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones descritas en el manual del operador del generador *power mate 7000* y las instrucciones de operación y mantenimiento del motor *Briggs & Stratton series 42000*.

4.1 Mantenimiento recomendado por el fabricante

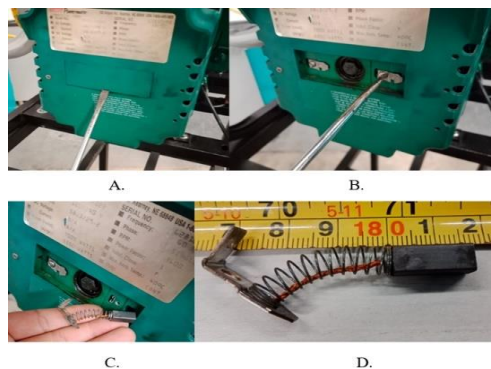
Para el desarrollo del proyecto es necesario que el grupo electrógeno se encuentre en óptimas condiciones, para ello se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

4.1.1 Recomendaciones para el generador

- Las escobillas deben inspeccionarse una vez al año en busca de anomalías y grietas, las escobillas se remplazan cuando su longitud sea menor a $\frac{1}{4}$ in o 7 mm. (Coleman Powermate, s.f)

Figura 2

Revisión de las escobillas



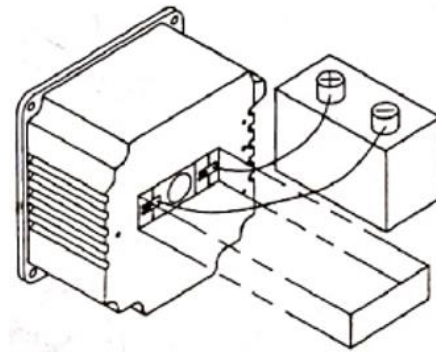
Nota. Para revisar las escobillas se debe seguir los siguientes pasos: 1, se debe retirar la tapa que se ilustra en la sección A con ayuda de un destornillador de pala; 2, se procede a desatornillar las escobillas como se observa en la sección B; 3 se retira las escobilla como en la sección C; 4, se mide la longitud de las escobillas como se observa en la sección D y 5, se pone la tapa que se ilustra en la sección A.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

- Si en el generador hay pérdidas de magnetismo el voltaje no se acumulará, será necesario excitar el generador. Para excitar el generador se debe tener en cuenta los siguientes pasos:
 - ✓ Usar una batería de 6 voltios de celda seca.
 - ✓ Retirar la tapa de las escobillas.
 - ✓ Arrancar el motor sin tener carga conectada al generador.
 - ✓ Conectar el polo negativo de la batería con la escobilla negativa, muy brevemente tocar el polo positivo de la batería con la escobilla positiva como se ilustra en la figura 3, retirar tan pronto se acumule el voltaje, para ello hay que medirlo.

Figura 3

Excitación del generador.



Nota. En la figura se ilustra la conexión de la batería de 6 voltios para la excitación del generador.

Tomado de *Coleman Powermate Generator Operator's Manual* (p. 14) del grupo electrógeno Powermate 7000 Comercial Electric.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

4.1.2 Recomendaciones para el motor

Un mantenimiento regular mejorará el rendimiento y extenderá la vida útil del motor para ello se deben tener en cuenta las instrucciones de la tabla 4 (Briggs&Stratton, 2007).

Tabla 4

Instrucciones de mantenimiento por horas

Compruebe el nivel de aceite	Cada 8 horas diariamente	25 horas cada temporada	50 horas cada temporada	100 horas cada temporada	100-300 horas
Revisar el nivel de aceite	✓				
Cambiar el aceite			✓ ■		
Cambiar el filtro de aire y de aceite				✓	
Limpiar sistema de purificación de aire		✓ ■■			
Inspección del escape o apagachispas			✓		
Limpiar o reemplazar bujías				✓	
Reemplazar filtro en la línea de combustible				✓	
Limpieza del sistema de refrigeración				✓ ■■	
Mantener cámara de combustión limpia					✓

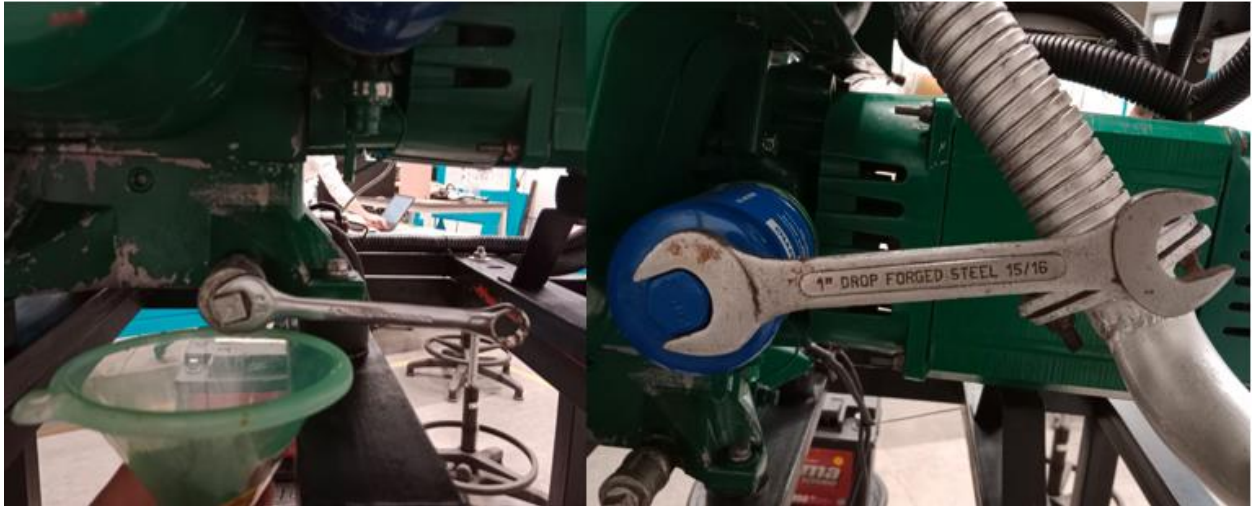
Nota. ■ indica que hay que cambiar el aceite después de las primeras 5 a 8 horas activo después de reparar el motor, luego cada 50 horas o cada temporada. Se recomienda cambiar el aceite cada 25 horas cuando el motor opere bajas cargas pesadas a altas temperaturas. ■■ Limpiar con

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

frecuencia en condiciones polvorrientas. Reemplazar el filtro del aire si está muy sucio Adaptado de *Briggs & Stratton Operating & Maintenance Instructions* (p. 11) del Motor del grupo electrógeno 7000 Comercial Electric.

Figura 4

Cambio del filtro de aceite



Nota. Para cambiar el filtro de aceite se deben seguir los siguientes pasos: 1, drenar el aceite del motor y retirar el filtro de aceite; 2, Antes de instalar un filtro nuevo se debe lubricar ligeramente la junta del filtro con aceite nuevo y limpio; 3, enroscar el filtro con la mano, hasta que la junta entre en contacto con el adaptador del filtro de aceite, apriete 1/2 a 3/4 más de vuelta; 4, agregar aceite nuevo y llene hasta la línea FULL en la varilla medidora; 5, Arrancar y hacer funcionar el motor para comprobar si hay fugas y 6, para el motor y comprobar el nivel de aceite, agregar si es necesario.

En la inspección del grupo electrógeno, se revisaron los componentes descritos en la tabla 5, realizando mantenimiento a los elementos que lo necesitaban. Posteriormente se procede a

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

encender el equipo trabajando con gasolina durante unos treinta minutos, observando que este opera correctamente.

Tabla 5

Operaciones de mantenimiento en el grupo electrógeno

Elemento	Estado Inicial	Operación de Mantenimiento
Filtro de aire	En óptimas condiciones	Limpieza
Dosificador de gas ANSI	El diafragma del distribuidor se encuentra parchado por esparadrapo ver figura 5.	Se descarta su uso, ya que al estar parchado no se garantiza su buen funcionamiento.
Instalación eléctrica	Se encontró algunos cables con la funda quemada, y empalmes con cinta aislante, ver figura 6.	Limpieza del cableado, cambio de cables quemados, ajuste de los empalmes con terminales e instalación de fundas protectoras.
Sistema de escape de gases	El exosto y el múltiple de escape se encuentran oxidados, ver figura 7.	Limpieza, lijada y pintada del exosto y el múltiple de escape con pintura resistente al calor.
Escobillas del generador	En óptimas condiciones.	Limpieza
Bobina de encendido	La funda de un cable que conecta las bujías tiene un corte.	Se recubrió en cinta aislante y posteriormente con funda termo encogible.
Aceite	En condiciones favorables, ya que el tiempo utilizado es corto.	Dejar el aceite actual
Filtro de combustible (gasolina)	Sucio, requiere cambio, ver figura 8.	Cambio del filtro
Filtro de aceite	En óptimas condiciones	Dejar el filtro actual
Base para la batería	No hay	Construcción de la base
Tanque de combustible	Requiere limpieza, por particulado en el filtro de gasolina	Se desmonto para un lavado y secado del tanque
Bujías	como nuevas	no se realizo

Figura 5

Dosificador de gas ANSI

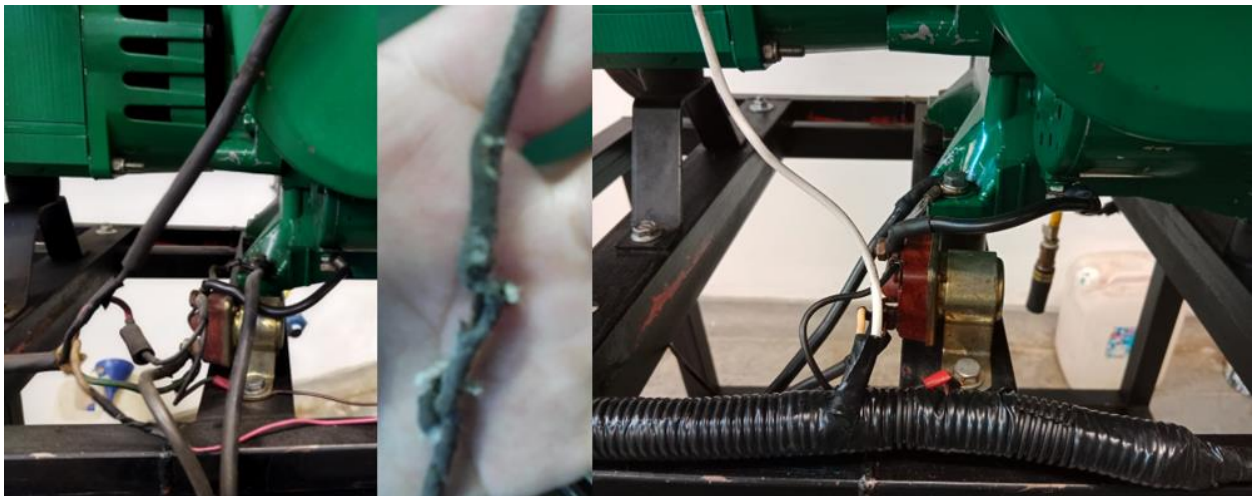
ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS



Nota. En la inspección se observa que el diafragma esta parchado con cinta esparadrapo.

Figura 6

Elementos de la instalación eléctrica



Nota. Antes y después de las de algunas conexiones eléctricas.

Figura 7

Exosto y múltiple de escape

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS



Nota. Elementos antes y después de pintarlos.

Figura 8

Filtro de gasolina



Nota. A la izquierda se observa el filtro con particulado, y a la derecha el filtro nuevo ya instalado.

5. Diseño del mezclador

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Durante el proceso de diseño o selección de un mezclador de aire/combustibles gaseosos es importante tener en cuenta que el dispositivo cuente con las características apropiadas, como la homogeneidad de la mezcla además de la proporción de las cantidades de caudal adecuadas según la relación aire/combustible descrita por un análisis de combustión ideal y el tipo de combustible.

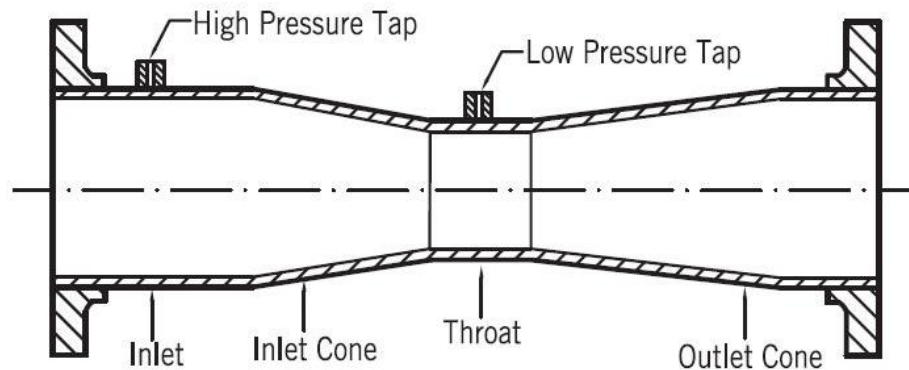
Los mezcladores de tipo estático se destacan debido a la simplicidad de su construcción, a bajos requerimientos de costo y tiempo por su fácil mantenimiento, además de no necesitar aporte de energía mecánica debido a que el mezclado de gases no se realiza con componentes móviles (Patiño, 2021).

Dentro de los dispositivos más utilizados para mezclar dos corrientes de gases se encuentra el tubo Venturi (ver figura 9). Este dispositivo basa su funcionamiento en la ecuación de Bernoulli y el principio de conservación de la masa. En un Venturi, un flujo al interior de la tubería es obligado a aumentar su velocidad momentáneamente durante su paso por una sección de diámetro reducido denominada garganta, lo cual genera a su vez una reducción en la presión local de esa zona; el cambio de velocidad es inversamente proporcional al cambio de presión; esto ligado a las propiedades del fluido y la geometría del tubo permiten conocer el comportamiento del fluido al interior (Upp & La Nasa, 2002).

Figura 9

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Vista transversal de un tubo tipo Venturi



Nota. Tomado de *Adaptación y evaluación del desempeño de un generador eléctrico utilizando biogás como combustible* (p. 25).

Durante la búsqueda y revisión bibliográfica, se encontró que existen diferentes metodologías basadas en el efecto Venturi que consiste en un fenómeno en el que un fluido en movimiento dentro de un ducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor denominada garganta. Para el desarrollo del presente trabajo, se analizó las metodologías de diseño propuestas por los autores Von Mitzlaff (Mitzlaff, 1988) y John R. Agudelo y Ricardo Mejía (Agudelo & Mejía, 2002).

5.1 Método de Mitzlaff

A continuación, se muestran las ecuaciones descritas por Von Mitzlaff para el dimensionamiento del mezclador tipo Venturi.

Paso 1. Determinar el volumen de admisión (ver Ecuación 1).

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

$$V_i = \frac{V_d}{2000} * \frac{n}{60} * n_{tot} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

V_i = Flujo de admisión de aire (m^3/s).

V_d = Cilindrada del motor (litros).

n = Eficiencia del motor (Adimensional).

n_{tot} = Regimen de giro del motor (rpm).

Paso 2. Determinar el área trasversal y la velocidad media de entrada del Venturi (ver Ecuación 2 y 3).

$$A_i = \frac{1}{4} * d_i^2 * \pi \quad (\text{Ec.2})$$

$$C_i = \frac{V_i}{A_i} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

A_i = Área de entrada o de succión del aire (m^2).

d_i = Diámetro de entrada o de succión del aire (m).

C_i = Velocidad promedio a la entrada (m/s).

Paso 3. Determinar la sección transversal de la garganta (ver Ecuación 4)

$$A_T = A_i * \frac{C_i}{C_T} \geq A_i * \frac{C_i}{150 (m/s)} \quad (\text{Ec.4})$$

El área de la garganta del Venturi se determina empleando la ecuación de continuidad y teniendo en cuenta que la contracción del aire causará que la velocidad aumente. Se debe asegurar que la velocidad no supere los 150 (m/s) para mantener la condición de flujo incompresible, es decir $M_a < 0,3$.

Paso 4. Determinar potencia del motor, poder calorífico del gas natural por volumen y el consumo específico del motor (ver Ecuación 5).

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

$$f_c = \frac{sfc * P}{QHV_{gas}} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

f_c = Flujo de admisión de combustible .

sfc = Consumo específico de combustible (g /Kw * h) .

P = Potencia del motor (Kw).

QHV_{gas} =

poder calorífico del gas natural (Kw * h fuel/Kw * h mecánica).

Paso 5. Determinar el área de admisión del gas natural (ver Ecuación 6).

$$A_g = \frac{f_c}{c_g} \quad (\text{Ec.6}).$$

Donde:

c_g = Velocidad máxima del flujo (m/s).

A_g = Área de descarga del combustible (m²).

La metodología propuesta por el autor Von Mitzlaff supone un rango de valores para el diámetro de la garganta y de admisión de combustible bastante amplio ya que:

$$C_T < 150 \text{ (m/s)}$$

$$C_g < 150 \text{ (m/s)}$$

5.2 Método de Agudelo y Mejía

En el año 2002, se presentó un artículo de la revista facultad de ingeniería de la universidad de Antioquia donde se publicó un modelo matemático para el diseño de la geometría de

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

mezcladores de tipo Venturi, con el fin de implementar gas natural como combustible en motores de combustión interna. Este modelo está basado en el análisis de flujo incompresible, en estado estable y unidimensional. Los principales parámetros de entrada para desarrollar el modelo son: las condiciones atmosféricas del lugar, la relación aire/combustible y las características del gas que se utilice como combustible. (Agudelo & Mejía , 2002).

A continuación, se define el área de la garganta y de descarga del gas combustible con las ecuaciones 7 y 8 respectivamente:

$$A_T = \frac{\dot{m}_a}{\sqrt{2 * \bar{\rho}_a}} * \frac{AC * \left(\frac{PCi}{W}\right)^2 + 1}{AC * \left(\frac{PCi}{W}\right)^2} \left[P_i - P_T + \frac{1}{2 * \bar{\rho}_a} * \left(\frac{\dot{m}_a}{A_i}\right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.7})$$

$$A_d = \frac{\dot{m}_f}{\sqrt{2 * \bar{\rho}_f}} * \left[P_T - P_d + \frac{1}{2 * \bar{\rho}_f} \left(\frac{\dot{m}_f}{A_{f,T}}\right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.8})$$

A continuación, se describen las ecuaciones que satisfacen los parámetros para calcular las áreas anteriormente mencionadas:

Paso 1. Calcular las temperaturas absolutas del aire y del gas combustible, con las ecuaciones 9 y 10 respectivamente:

$$T_{a,T} = \frac{T_i}{\left[\frac{AC \left(\frac{PCi}{W}\right)^2}{\left(\frac{PCi}{W}\right)^2 * P_i} * \frac{P_T}{P_i} \right]^{\frac{1-K_a}{k_a}}} \quad (\text{Ec.9})$$

$$T_{f,T} = \frac{T_d}{\left[\frac{1}{\left(\frac{PCi}{W}\right)^2} * \frac{P_T}{P_d} \right]^{\frac{1-K_f}{k_f}}} \quad (\text{Ec.10})$$

Paso 2. Calcular el valor de la densidad de la mezcla al interior d la garganta con la ecuación 11:

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

$$\rho_m = \frac{P_T}{R_u} \left[\frac{AC*d_g(M_a+M_f)}{AC*d_g+1} \right] \left[\frac{Cp_{f,T}+AC*Cp_{a,T}}{h_{f,T}+AC*h_{a,T}} \right] \quad (\text{Ec.10})$$

Paso 3. Calcular el valor del flujo másico ideal y real, con las ecuaciones 11 y 12 respectivamente:

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{\rho_m * V_d * n}{i} \quad (\text{Ec.11})$$

$$\dot{m}_m = n_v * \dot{m}_{ideal} \quad (\text{Ec.12})$$

Paso 4. Calcular el valor de los flujos másicos del aire y el combustible, con las ecuaciones 13 y 14 respectivamente:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_m \left[\frac{AC}{AC+1} \right] \quad (\text{Ec.13}). \quad AC = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (\text{Ec.14})$$

Por otra parte, es necesario realizar el cálculo de la densidad promedio del gas entre el área de descarga y la garganta, debido a que el proceso de expansión del gas al ser descargado en la garganta produce un cambio drástico en la presión y se puede considerar como un proceso adiabático. La densidad promedio se puede calcular con la ecuación 15:

$$\bar{\rho}_f = \frac{\rho_{f,d}}{2} \left[1 + \left(\frac{P_T}{P_d} \right) \right]^{\frac{1}{k_f}} \quad (\text{Ec.15})$$

De manera análoga se realiza el mismo procedimiento para el cálculo de la densidad promedio del aire con la ecuación 16:

$$\bar{\rho}_a = \frac{\rho_{a,i}}{2} \left[1 + \left(\frac{P_T}{P_d} \right) \right]^{\frac{1}{k_f}} \quad (\text{Ec.16})$$

Por último, se realiza el cálculo del área de flujo para el gas en la garganta. La ecuación 17 es la encargada de relacionar las áreas de descarga y garganta, ya que es necesario tener el área de garganta para obtener el valor del área de descarga de gas:

$$A_{f,T} = A_T * \frac{1}{AC * \left(\frac{P_C i}{W} \right)^2 + 1} \quad (\text{Ec.17})$$

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Tabla 6

Parámetros de entrada utilizados en el modelo de Agudelo y Mejía para el diseño del Venturi

Parámetros de entrada		
Subíndice	Definición	Unidad
V_d	Cilindrada del motor	m^3
n	Régimen de giro	rad/s
n_v	Eficiencia volumétrica del motor	Adimensional
i	Número de revoluciones del cigüeñal por cada carrera de potencia	Adimensional
AC	Relación aire combustible	Adimensional
P_d	Presión de descarga del gas	Kpa
P_i	Presión en la admisión del aire	Kpa
T_d	Temperatura absoluta de descarga del gas	K
T_i	Temperatura absoluta del aire en la sección del aire	K
K_a	Coeficiente adiabático del aire	Adimensional
K_f	Coeficiente adiabático del gas	Adimensional
PC_i	Poder calorífico inferior del gas	Kwh/m^3
W	Índice de Woobe	Kwh/m^3
M_a	Masa molar del aire	$Kg/Kmol$
M_f	Masa molar del gas	$Kg/Kmol$
R_u	Constante universal de los gases ideales	$Kpa * m^3 / Kmol$

Teniendo en cuenta la revisión de los métodos para el diseño de mezcladores tipos Venturi, se optó por trabajar con el modelo de Agudelo y Mejía debido a que, aunque utiliza las mismas suposiciones de flujo incompresible unidimensional, en estado estacionario, los autores toman en consideración la variación de la densidad con respecto al cambio de presión y temperatura. El proceso de expansión del aire y del gas se ha considerado adiabático.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Por otra parte, el modelo de Mitzlaff, al describir un rango de valores tan amplio para el área de la garganta y el área de descarga del gas, genera un mayor grado de incertidumbre en los valores dados.

Se realizaron los respectivos cálculos los cuales se pueden observar en el anexo A.

Tabla 7

Valores obtenidos mediante el método Agudelo

Método	A_d	D_d	A_T	D_T
Agudelo	8,198 mm ²	3,2 mm	211,3 mm ²	16,5 mm

Mediante el método descrito por Mitzlaff se comprobó que los resultados obtenidos cumplieron con la condición de velocidad de flujo en la garganta menor a 150 m/s. De esta manera se garantizó que el flujo se mantenga en la condición de flujo incompresible, teniendo en cuenta el cambio de diámetro de la sección de entrada hasta la sección de la garganta del mezclador.

6. Modelado y construcción del dispositivo

Para el modelado 3D se utilizaron las dimensiones geométricas obtenidas por el método de Agudelo y Mejía: el diámetro de la garganta, y el diámetro de la sección de descarga del gas, que se conecta al suministro por medio de una rosca de tubería cónica de 3/8 NPT. La descarga del gas

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

se divide en tres perforaciones alrededor de la garganta como se ilustra en la sección G-G en la figura 10, para homogenizar la mezcla de los gases.

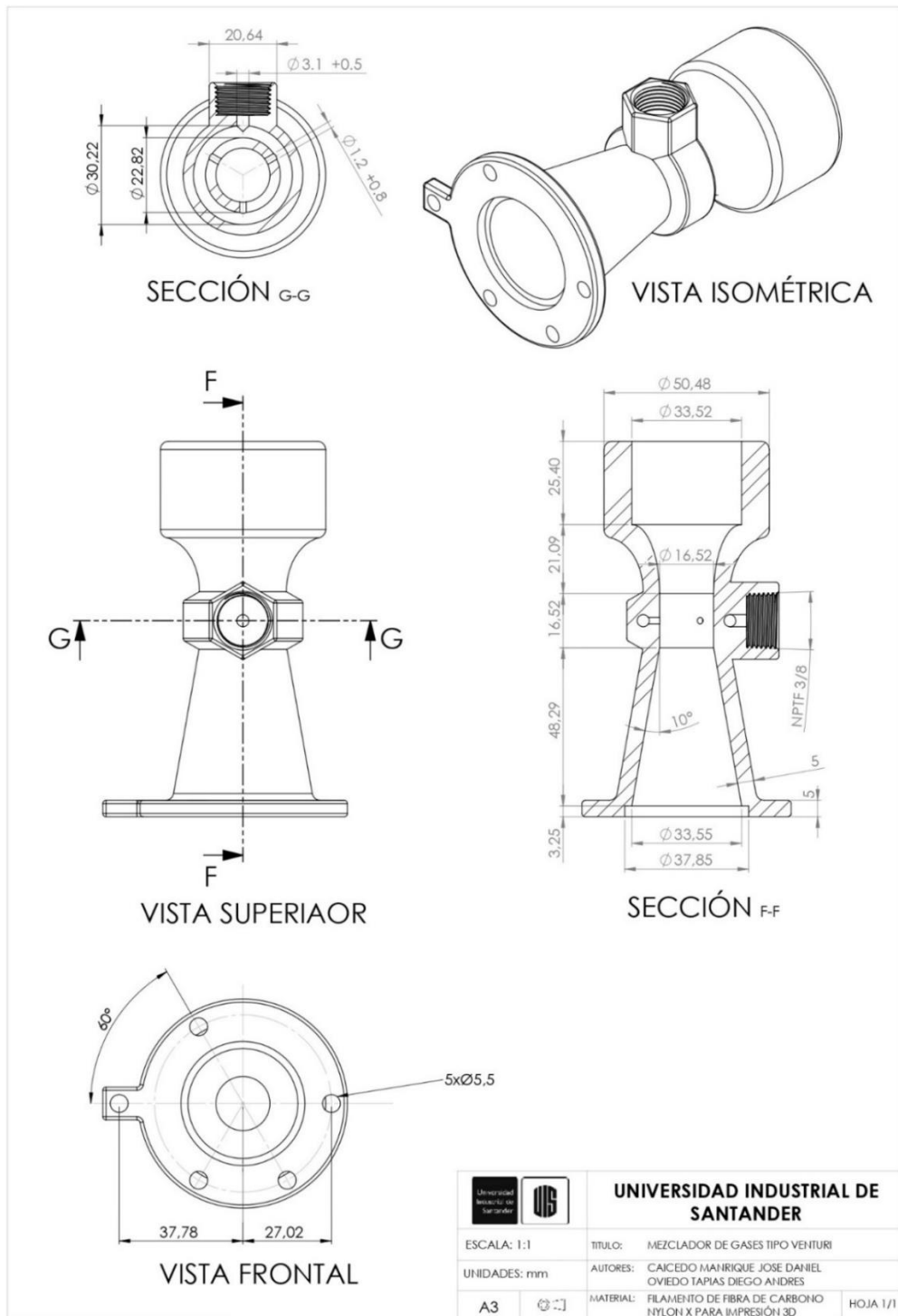
El mezclador Venturi estará acoplado entre el carburador y una manguera de admisión de aire de dos pulgadas, de ahí se obtienen los parámetros para conectar el mezclador al grupo. El diseño del perfil del mezclador consta de una admisión de aire cilíndrica, seguida de una entrada convergente, lo que provoca una diferencia de presión en la garganta donde se produce la mezcla de los gases, seguido de una salida de expansión cónica divergente como se ilustra en la sección F-F de la figura 10. Lo anterior se realiza teniendo en cuenta las geometrías recomendadas por la norma ASME MFC-3M para medición del flujo de fluidos en tuberías por orificio, boquilla y Venturi.

Para el perfil convergente se hizo selección de una boquilla de radio largo, cuya forma es un cuarto de elipse y una garganta cilíndrica (ver figura 11) y por consideraciones del diseñador se le sumo 4,3 milímetros al radio horizontal de la elipse, ya que esta norma se cumple para dispositivos de medición de flujo para tuberías desde los 50 mm hasta los 1200 mm y se usó como guía para el diseño del mezclador, teniendo en cuenta que el diámetro de admisión de aire del mezclador es de 35 mm aproximadamente.. Con este dato, la geometría recomendada por la ASME queda muy similar a una circunferencia. Para el perfil divergente cónico se trabajó con un Angulo de 20° (ASME, 2004).

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 10

Plano del Mezclador Venturi



Nota. Realizado en SolidWorks.

Figura 12

Impresión 3D del Mezclador Venturi



6.1 Implementación y adaptación del mezclador

Para la implementación del dispositivo mezclador en el motor fue necesario cambiar la posición del filtro de aire, del tanque de combustible (ver figura 13). Posteriormente, se adaptó el suministro de GNC, (ver figura 14) y se instaló el sistema que conmuta de gasolina a gas (ver figura 15).

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

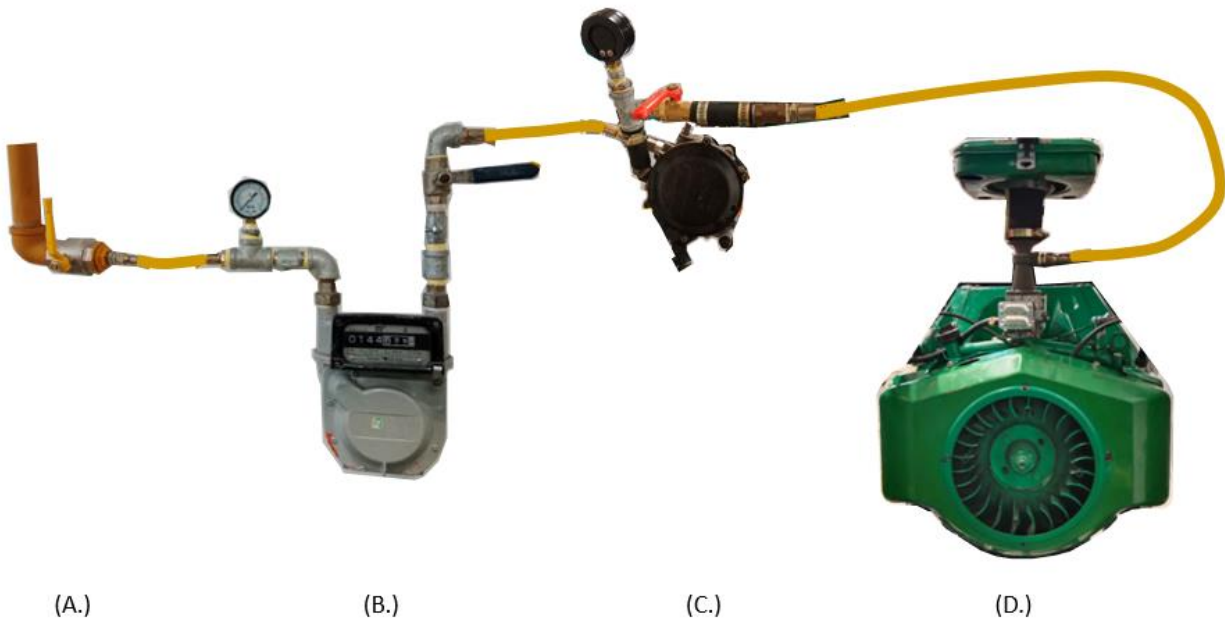
Figura 13

Grupo electrógeno antes y después



Figura 14

Instalación para el GNC

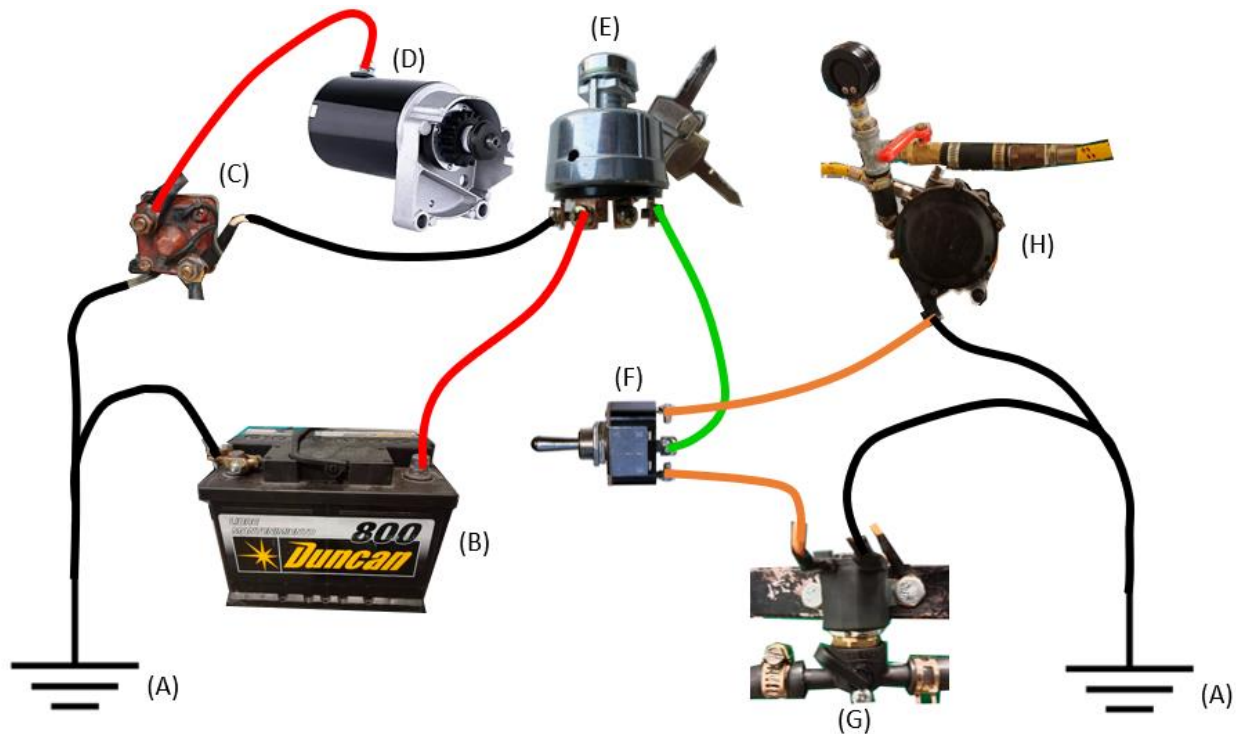


ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Nota. En la sección A se observa el suministro de GNC que llega al laboratorio; en la sección B un manómetro que indica la presión del gas conectado al medidor de consumo de tipo diafragma; en la sección C se muestra un regulador de GNC marca Lovato, equipado con una electroválvula para el suministro del combustible, y en la sección D se observa la conexión al mezclador de gases.

Figura 15

Conexión eléctrica para conmutar de gasolina a GNC



Nota. A representa la conexión a masa o polo a tierra; B, una batería de 12 voltios a 800 amperes, C es la bobina de encendido, D es el motor eléctrico de arranque, E es el interruptor de encendido, F es un interruptor on-of-on, el cual conmuta el sistema de gasolina a gas; G es la electroválvula para el paso de gasolina y H es el regulador de GNC, el cual tiene una electroválvula para el paso de gas.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Al momento de operar el grupo electrógeno se observó que al funcionar con GNC el motor trabajaba adecuadamente con un sonido de operación agradable, en cambio al trabajar con gasolina el motor no trabajaba correctamente, se aceleraba, se apagaba y su sonido de funcionamiento no era el adecuado. Por estos motivos se decidió revisar el carburador, al cual se le realizó la operación de mantenimiento que consistió en el desmonte y limpieza para las partes del carburador (ver figura 16). Al momento de realizar la prueba de funcionamiento se observó que el equipo seguía trabajando mal con gasolina, por tal razón se reemplazó el carburador por uno nuevo como se observa en la figura 17. Esta pieza fue financiada por la escuela de ingeniería mecánica, ver factura en el anexo C.

Figura 16

Partes del carburador del grupo electrógeno

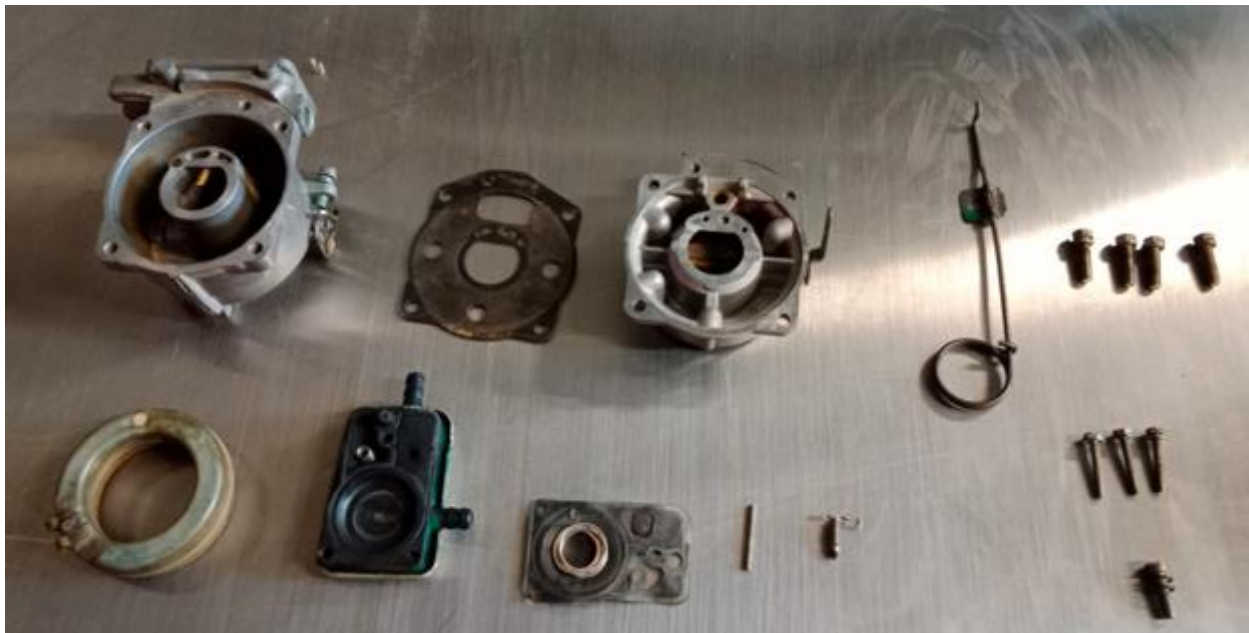
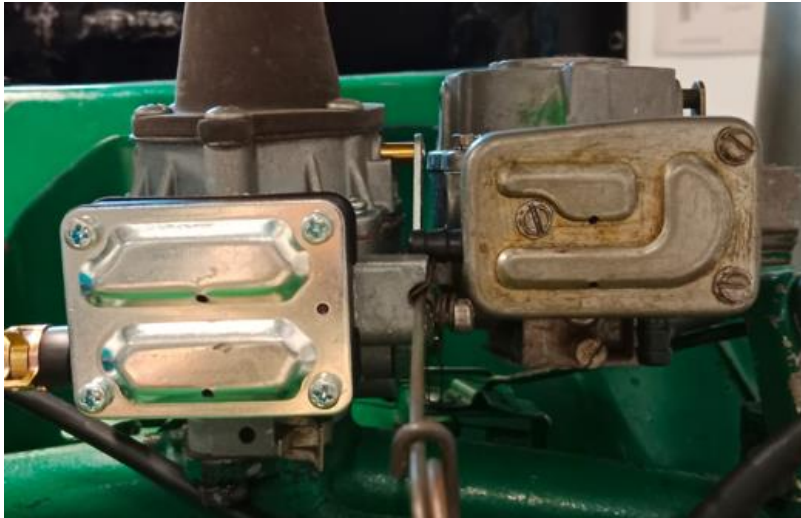


Figura 17

Carburador del grupo electrógeno



Nota: A la izquierda se puede observar el carburador nuevo que se le instalo a grupo electrógeno y a la derecha se observa carburador viejo del equipo.

7. Análisis teórico de los combustibles

La combustión de hidrocarburos en presencia de aire implica diferentes reacciones químicas elementales y sustancias químicas. Desarrollar el cálculo de tal análisis teniendo en cuenta absolutamente todos los parámetros y variables involucrados esta fuera del alcance del ingeniero de diseño o de operación, por tanto, a continuación, se plantea modelo más simplificados de combustión teórica o ideal.

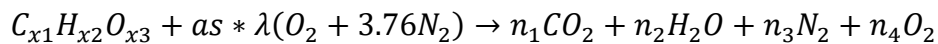
7.1 Análisis estequiométrico de la combustión

La estequiometria se encarga del balance másico y volumétrico entre los reactivos y los productos. Los principales aspectos para determinar son:

- Cantidad exacta de aire para realizar la combustión.
- Productos de la combustión y su composición.

Para obtener estos valores es necesario un proceso ideal de combustión, que básicamente depende de la composición de los reactivos.

Dada una combustión completa se obtiene la siguiente reacción química:



Donde as corresponde al número de moles de aire teórico por mol de combustible como se observa en la ecuación

$$as = X_1 + \frac{X_2}{4} - \frac{X_3}{2} \quad (\text{Ec.18})$$

7.1.1 Balance de materia

Durante el proceso de cualquier reacción química, se realiza un balance con base en el principio de la conservación de la masa, el cual establece que la masa total de cada componente de la reacción se conserva durante todo el proceso. De este modo es posible conocer los coeficientes de cada uno de los reactivos y productos. (Cengel & Boles, 2004)

- Balance de Carbono: $X_1 = n_1$
- Balance de Hidrogeno: $X_2 = 2 * n_2$
- -Balance de Nitrógeno: $(2 * 3.76 * a_s * \lambda) = 2 * n_3$
- Balance de Oxígeno: $X_3 + 2 * a_s * \lambda = 2 * n_1 + n_2 + 2 * n_4$

7.1.2 *Parámetros de combustión*

Durante el proceso de combustión en un motor existen varios parámetros que definen el funcionamiento del mismo y varían según el contexto operativo.

A continuación, se describen dos de los parámetros más importantes:

7.1.2.1 Relación aire-combustible teórica ideal. Es el análisis para conocer la cantidad de aire necesario para producir una combustión completa (ver Ecuación 19).

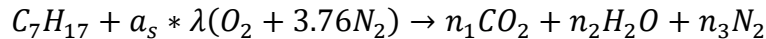
$$a_s = m_{aire_{teorico}}/m_{combustible} = \frac{28.97(4.76*a_s)}{(12.01*X_1+1.008*X_2+16*X_3)} \quad (Ec.19).$$

7.1.2.2 Factor de aire de la combustión λ (Lambda). Es el encargado de determinar la proporción de aire y combustible que debe mezclarse para obtener una óptima combustión en motores de ignición por chispa de ciclo Otto. Este factor compara la proporción estequiométrica de la mezcla.

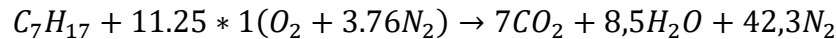
- $\lambda < 1$: Significa que hay déficit de aire por lo tanto la mezcla es rica y la combustión reductora.
- combustión oxidante. $\lambda > 1$: Significa que hay exceso de aire por lo tanto la mezcla es pobre y la
- $\lambda = 1$: Combustión ideal (no se presenta en la realidad).
- $\lambda = m_{aire_{real_{admitido}}}/m_{aire_{teorico_{necesario}}$.

7.2 Combustión teórica de la gasolina

Con base en las ecuaciones anteriormente mencionadas se realiza el análisis de la gasolina con un factor lambda (λ) igual a 1, es decir, a combustión ideal:



- Numero de moles teóricas de aire por mol de combustible es: $a_s = 7 + 17/4 = 11,5$
- Balance de Carbono: $7 = n_1$
- Balance de Hidrógeno: $17 = 2 * n_2 \rightarrow n_2 = 8,5$
- Balance de Nitrógeno: $2 * 3.76 * 11.25 = 2 * n_3 \rightarrow n_3 = 42,3$
- La ecuación balanceada quedaría de la siguiente forma:



- Relación aire-combustible ideal es:

$$a_s = m_{aire_{teorico}} / m_{combustible} = \frac{28.97(4.76 * 11.5)}{(12.01 * 7 + 1.008 * 17)}$$

- Por tanto $a_s = 15.27$ (kg aire/kg combustible)

Por último, se utilizó el código denominado “Equilibrium combustion solver” (Kirkpatrick, 2007) para determinar las fracciones molares de los productos y del mismo modo validar los resultados obtenidos con el análisis anteriormente realizado (ver figura18).

Figura 18

Calculo fracciones molares para gasolina

Equilibrium Combustion Solver

Pressure (kPa)		101.8	
Temperature (K)		300	
Fuel Air equivalence ratio		1.0	
Choose Fuel Type:		Gasoline-C7H17	v
Press Enter for computation:		Enter	

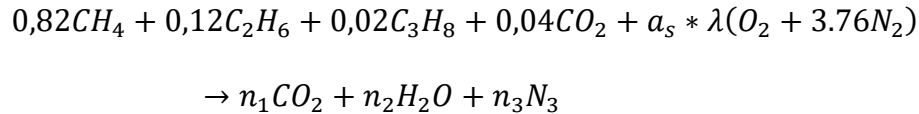
<p>MOLE FRACTIONS :</p> <p>Mole Fraction CO₂ : 0.120501</p> <p>Mole Fraction H₂O : 0.146323</p> <p>Mole Fraction N₂: 0.732202</p> <p>Mole Fraction O₂: 9.73E-4</p> <p>Mole Fraction CO: 0.0</p> <p>Mole Fraction H₂: 0.0</p> <p>Mole Fraction H: 0.0</p> <p>Mole Fraction O: 0.0</p>	<p>MIXTURE PROPERTIES :</p> <p>h (kJ/kg): -2905.</p> <p>u (kJ/kg): -2993.</p> <p>s (kJ/kg K): 7.034</p> <p>v (m³/kg): 0.860</p> <p>Molecular Weight: 28.47</p>
---	--

Nota. Adaptado de “*Equilibrium combustion solver*”
 <<https://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page1/page1f.html>>. El código numérico utiliza las ecuaciones descritas en el libro de Ferguson para calcular las propiedades termodinámicas y fracciones molares de los gases de escape.

7.3 Combustión teórica del gas natural

Con base en las ecuaciones anteriormente mencionadas se realiza el análisis de gas natural con un factor lambda (λ) igual a 1, es decir, a combustión ideal:

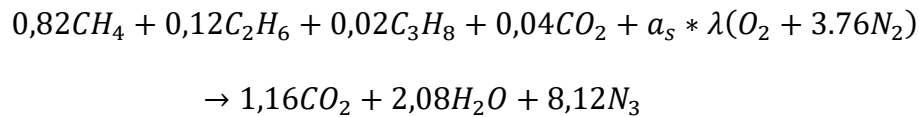
ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS



- Número de moles teóricas de aire por mol de combustible:

$$a_s = (0,82 + 0,12 * 2 + 0,02 * 3 + 0,04) + \frac{(0,82*4+0,12*6+0,02*8)}{4} - \frac{0,04*2}{2} = 2,16$$

- Balance de Carbono: $0,82 * 1 + 0,12 * 2 + 0,02 * 3 + 0,04 * 1 = n_1 \rightarrow n_1 = 1,16$
- Balance de Hidrógeno: $0,82 * 4 + 0,12 * 6 + 0,02 * 8 = n_2 * 2 \rightarrow n_2 = 2,08$
- Balance de Nitrógeno: $2 * 3.76 * 2,16 = n_3 * 2 \rightarrow n_3 = 8,12$
- La ecuación balanceada quedaría de la siguiente manera:



- Relación aire-combustible ideal es:

$$a_s = m_{aire_{teorico}}/m_{combustible} = \frac{28.97(4.76 * 2,16)}{(12.01 * 1,16 + 1.008 * 4,16 + 16 * 0,08)}$$

- Por tanto $a_s = 15.41$ (kg aire/kg combustible)

De igual manera se utilizó el código numérico para obtener las fracciones molares de los productos y una validación aproximada de los resultados, ver figura 19.

Figura 19

Calculo fracciones molares para gas natural

Equilibrium Combustion Solver

Pressure (kPa)		101.8	
Temperature (K)		300	
Fuel Air equivalence ratio		1.2	
Choose Fuel Type:		Methane-CH4	v
Press Enter for computation:		Enter	

<p>MOLE FRACTIONS :</p> <p>Mole Fraction CO2 : 0.107875</p> <p>Mole Fraction H2O : 0.143837</p> <p>Mole Fraction N2: 0.67637</p> <p>Mole Fraction O2: 0.0</p> <p>Mole Fraction CO: 1.0E-6</p> <p>Mole Fraction H2: 0.071917</p> <p>Mole Fraction H: 0.0</p> <p>Mole Fraction O: 0.0</p>	<p>MIXTURE PROPERTIES :</p> <p>h (kJ/kg): -2920.</p> <p>u (kJ/kg): -3014.</p> <p>s (kJ/kg K): 7.467</p> <p>v (m3/kg): 0.927</p> <p>Molecular Weight: 26.42</p>
--	---

Nota. Adaptado de “*Equilibrium Combustion Solver*”
 <<https://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page1/page1f.html>>. A diferencia del modelo de combustión teórico utilizado anteriormente para el gas natural en el código se utiliza una composición más sencilla tomando el gas en su totalidad como metano.

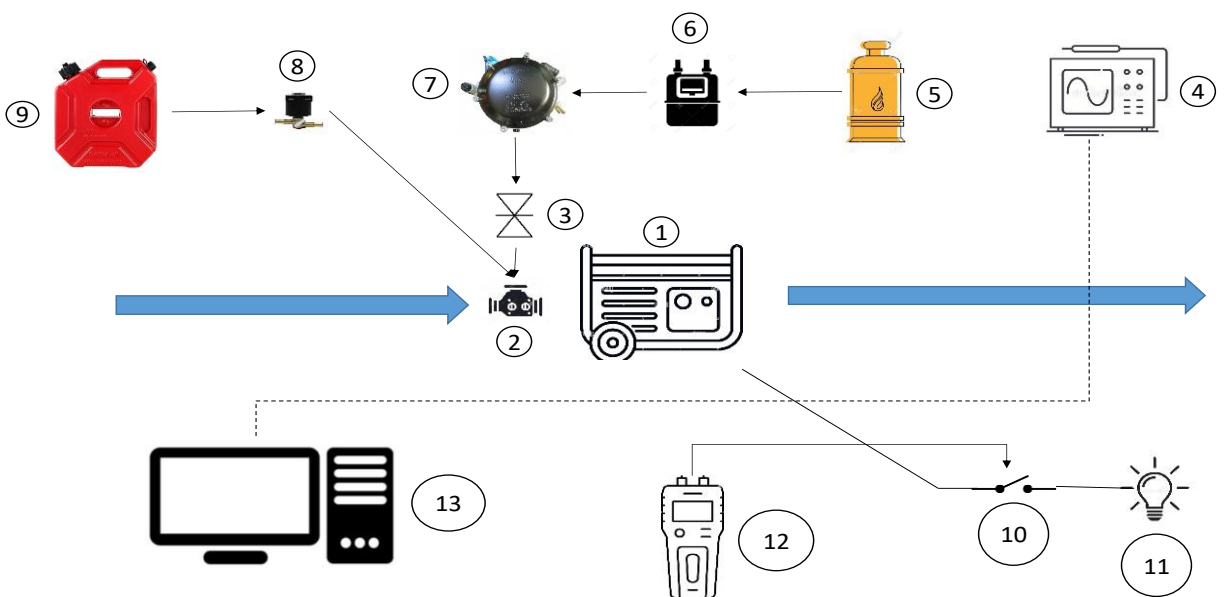
8. Pruebas de desempeño y emisiones del grupo electrógeno con los combustibles

Con el fin de realizar el estudio de funcionamiento del grupo electrógeno ubicado en el laboratorio de MTA, con los diferentes combustibles, a continuación, se detallan los datos obtenidos en las diferentes pruebas y su respectivo análisis, iniciando con la toma de datos de las emisiones de escape y posteriormente se realizó la toma de datos de potencia generada y consumo específico de combustible para obtener la eficiencia del motor a diferentes valores de carga

El montaje del banco para la toma de datos se muestra en la figura 20 y 21 donde se nombran y enumeran los equipos principales.

Figura 20

Esquema y componentes del banco de pruebas



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

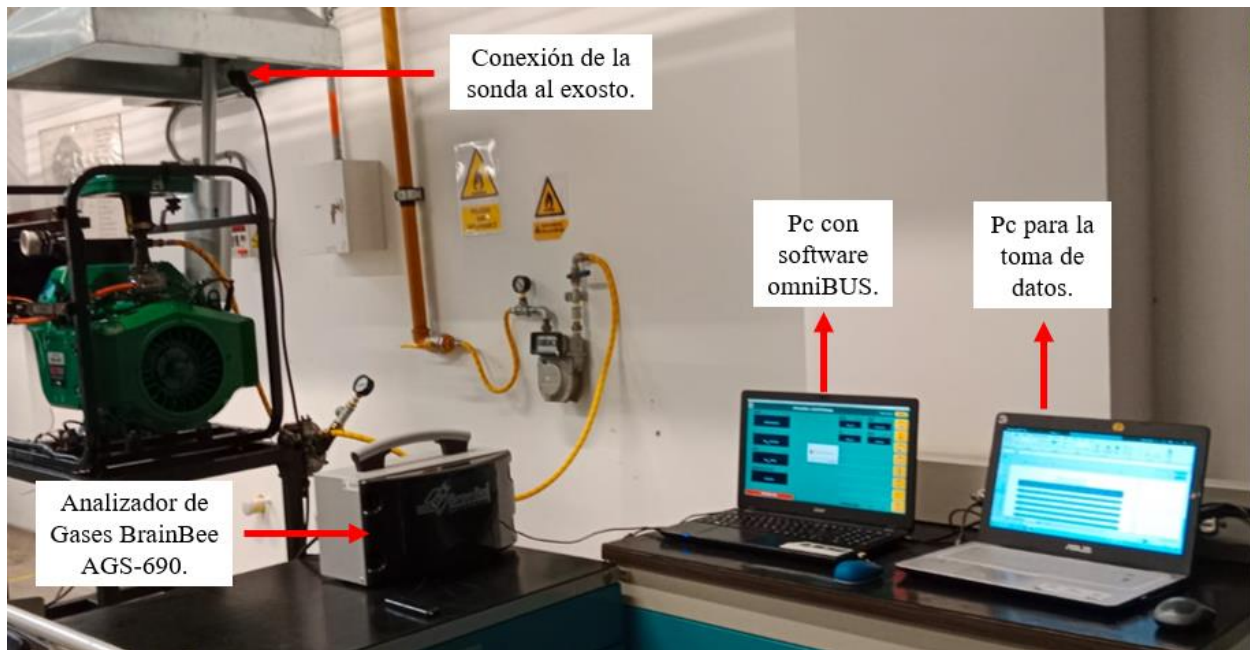
Tabla 8

Lista de componentes del banco de pruebas

No.	Descripción
1	Grupo electrógeno
2	Carburador
3	Mezclador de gas
4	Analizador de gases
5	Línea de suministro de gas natural
6	Contador de gas natural
7	Regulador de gas natural
8	Electroválvula de gasolina
9	Tanque de gasolina
10	Control de carga manual
11	Tablero de carga (bombillas)
12	Pinza amperimétrica
13	Computador

Figura 21

Montaje para las pruebas de gases de escape.



A continuación, se presenta una breve descripción de los equipos utilizados para la toma de datos experimentales:

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

- A fin de estudiar la composición de los gases de escape se utilizó un analizador de gases BrainBee tipo AGS-690, al cual se le realizó un análisis y calibración con gases patrón para conocer la precisión del dispositivo. Los campos de medición del analizador se observan en el anexo D.

Para el proceso de calibración se utilizaron gases patrón facilitados por el CDA Santander como se ilustra en la figura 22, ubicado en Bucaramanga los cuales cuentan con la composición descrita en la tabla 9.

Figura 22

Calibración con los gases patrón



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Tabla 9

Composición de los gases patrón

Punto	HC Propano (ppm)	Monóxido de carbono (%)	Dióxido de carbono (%)
Bajo	306	1.0	6.0
Medio	1208	4.0	12.0
Alto	3188	8.0	12.2

Una vez conocida la composición de los gases patrón y realizada el ajuste del equipo se obtiene un porcentaje de error en la medición (ver tabla 10), teniendo en cuenta el factor de equivalencia de propano que para el equipo utilizado es de P.E.F.= 0,506.

Tabla 10

Porcentaje de error con respecto a los gases patrón

Punto	HC Propano (ppm)	HC Propano con P.E.F. (ppm)	Monóxido de carbono (%)	Dióxido de carbono (%)	Porcentaje de error HC (%)	Porcentaje de error CO (%)	Porcentaje de error CO2 (%)
Bajo	157	310,28	1.0	6.0	1.399	0	0
Medio	596	1177,86	3.91	11.6	2.495	2.25	3.333
Alto	1572	3106,72	7.89	11.9	2.55	1.375	2.46

Nota. Se observa un máximo porcentaje de error de 3.333 % para el punto de media en porcentaje de dióxido de carbono, mientras que en el punto de baja se observa que no existe porcentaje de error para los valores de Monóxido de carbono y Dióxido de carbono.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 23

Registro de calibracion del analizador de gases

CALIBRACIÓN OFICIAL		PARA SALIR
FECHA ÚLTIMA CALIBRACIÓN		09/11/2022
FECHA VENCIMIENTO CONTROL PERIÓDICO		09/11/2023
VALORES CILINDRO		
CO	:	1.00
CO2	:	06.0
HC (Propano)	:	0306
HC (Hexano)	:	
P.E.F.	:	0.506
ESPERE POR FAVOR CALIBRACIÓN EN CURSO		

Durante el proceso de calibración fue necesario acceder al software OMNIBUS 800, el cual por medio de una interfaz gráfica en un ordenador registra los datos, además de tener acceso al apartado de sistema y ajuste dentro del programa. Este fue facilitado por el servicio técnico postventas de la empresa GLOBAL LATAM con sede física en la ciudad de Cali, Colombia.

- El laboratorio cuenta con una pinza amperimétrica UNI-T UT231. Este equipo nos permitió la toma de datos de potencia generada de manera directa, ya que se toman los valores de corriente y voltaje de manera simultánea. En el proceso para la toma de datos de potencia se debía tener en cuenta las dos fases del tablero de consumo. Se utilizó un contador de gas tipo membrana YASAKI modelo YV2A, el cual determinó la cantidad de gas natural expresado en unidades de volumen (metros cúbicos).

-

8.1 Emisiones de escape

La emisión de gases de escape y su composición depende de la calidad de combustible, la relación aire-combustible y el tipo de motor probado. Por ende, se realizó un análisis teniendo en cuenta los siguientes parámetros: lambda (λ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos no quemados (HC), Oxígeno (O_2), y las revoluciones del motor (RPM), los cuales fueron proporcionados por el analizador de gases, exceptuando las revoluciones que son obtenidas por el tacómetro del motor.

Para obtener un menor grado de incertidumbre, cada prueba realizada se repitió tres veces con cada combustible. A continuación, se muestran las tablas 11 y 12 de los datos obtenidos iniciando con gasolina, ya que es el combustible propiamente utilizado para el funcionamiento del motor.

Tabla 11

Resultados gases de escape utilizando gasolina como combustible

Carga [w]	Rpm	λ	CO %v/v	CO ₂ %v/v	O ₂ %v/v	HC ppm
500	803	1,49	1,86	7,67	10,9	2917
1000	793	1,45	2,52	6,87	10,7	3430
1500	760	1,45	2,92	5,60	11,4	3970
2000	768	1,23	2,62	6,07	10,6	3427
2500	743	1,28	3,76	5,67	10,7	4527
3000	687	1,12	4,17	6,73	8,6	3808
3500	683	1,26	3,5	5,47	11,3	3920
4000	667	1,29	3,99	5,63	10,5	3423
4500	642	1,28	4,12	5,97	10,1	3560
5000	602	1,29	3,98	5,40	11,1	3633

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Tabla 12

Resultados gases de escape utilizando gas natural como combustible

Carga [w]	Rpm	λ	CO % v/v	CO ₂ % v/v	O ₂ % v/v	HC ppm
500	560	3,01	0,05	3,3	15,3	1807,67
1000	552	3,15	0,05	3	15,6	2013
1500	532	3,15	0,04	3,07	15,6	2150
2000	537	2,96	0,04	3,27	15,2	2061
2500	547	2,74	0,05	4,03	14	1980
3000	522	2,48	0,05	4,17	14,1	2139
3500	510	2,51	0,04	4,73	13,2	1965
4000	513	2,47	0,04	4,37	13,7	2349
4500	485	2,33	0,04	4,33	13,5	2161
5000	450	2,36	0,19	4,27	13,3	2292

La presión con la cual se realizaron las pruebas de gas natural corresponde a 5 PSI aproximadamente, valor marcado por dos manómetros adecuados en la línea de suministro de gas natural, ubicando el primero antes del contador de gas y el segundo después del regulador de presión.

Como se observó en las anteriores tablas los valores de lambda son mayores que uno (1) tanto para la gasolina como para el gas natural. Esto conlleva a tener un exceso de aire (mezcla pobre) para ambos casos, aunque en las pruebas realizadas con gas natural muestran un exceso de aire muy alto obteniendo valores de 214 % de aire estequiométrico o superiores, lo que influyó directamente en una disminución de producción de gases de efecto invernadero y el aumento de productos inquemados como el Oxígeno (O_2), produciéndose además una pérdida de calor.

A continuación, se presenta las gráficas de cada uno de los productos obtenidos por el analizador de gases (CO , CO_2 y HC) con respecto a la carga que se le impone al grupo electrógeno.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 24

Monóxido de carbono (%V) vs Carga con gasolina

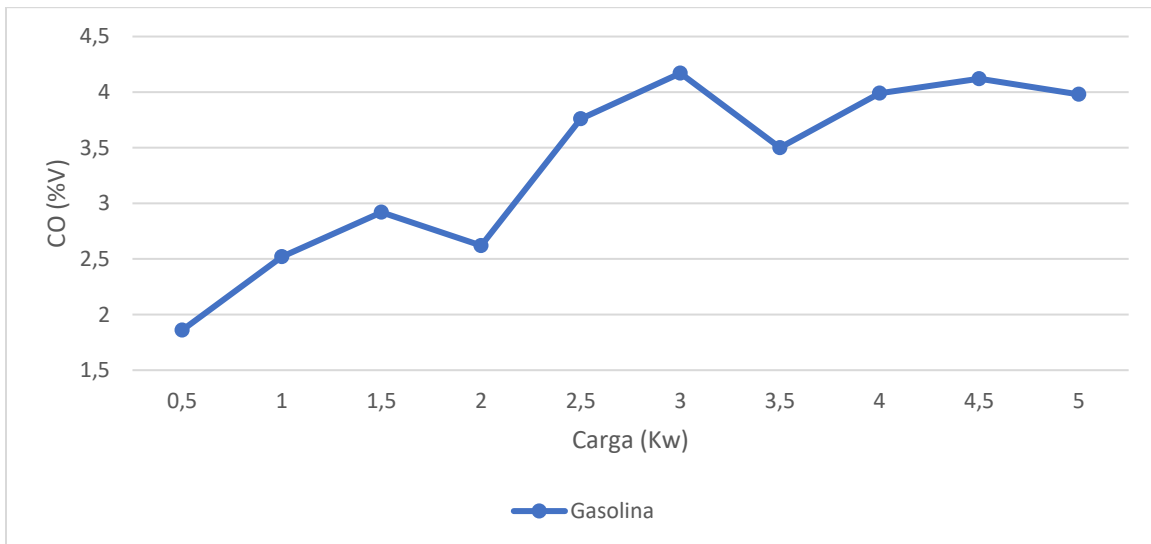
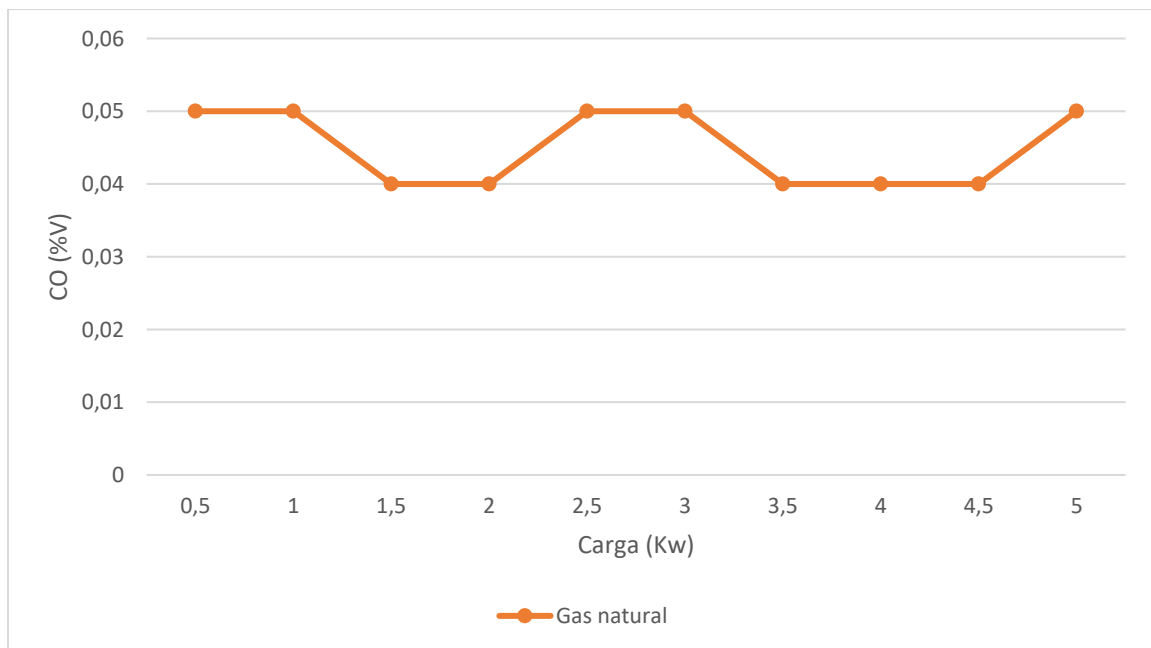


Figura 25

Monóxido de carbono (%V) vs Carga con gas natural



Se observó, en la figura 24, que debido a una combustión con exceso de aire utilizando gas natural como combustible se obtienen valores casi imperceptibles de monóxido de carbono ya que

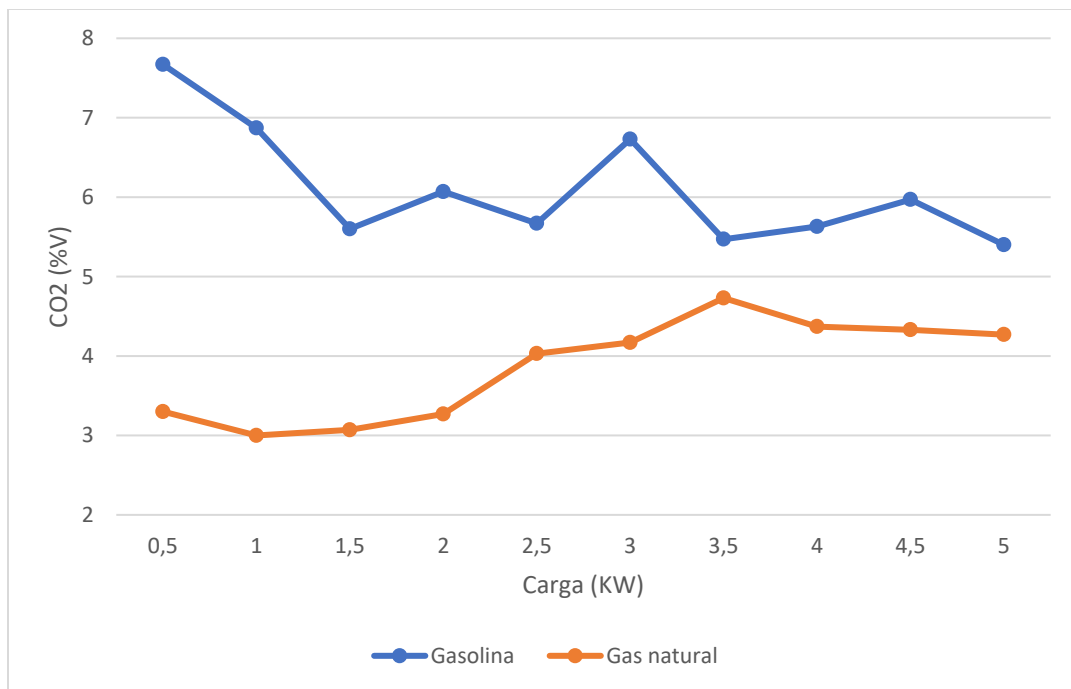
ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

no superan el 0,06 % de volumen de los gases de escape, lo que significó un beneficio debido a que este gas es bastante toxico.

Por otra parte, cuando utilizamos gasolina como combustible se observa un rango de valores entre 1.86-4.22 % de volumen de monóxido de carbono. El resultado es aceptable teniendo en cuenta lo descrito en el artículo 7 de la resolución 910 de 2008, mediante la cual “se reglamentan los niveles permitidos de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles clasificadas como motocicleta, motociclo o moto triciclo (dos tiempos) “cabe aclarar que esta normativa no aplica para motores estacionarios pero debido a parámetros como tamaño, rango de potencias, cilindrada y combustible es la referencia más próxima.

Figura 26

Dióxido de carbono (CO_2) vs Carga



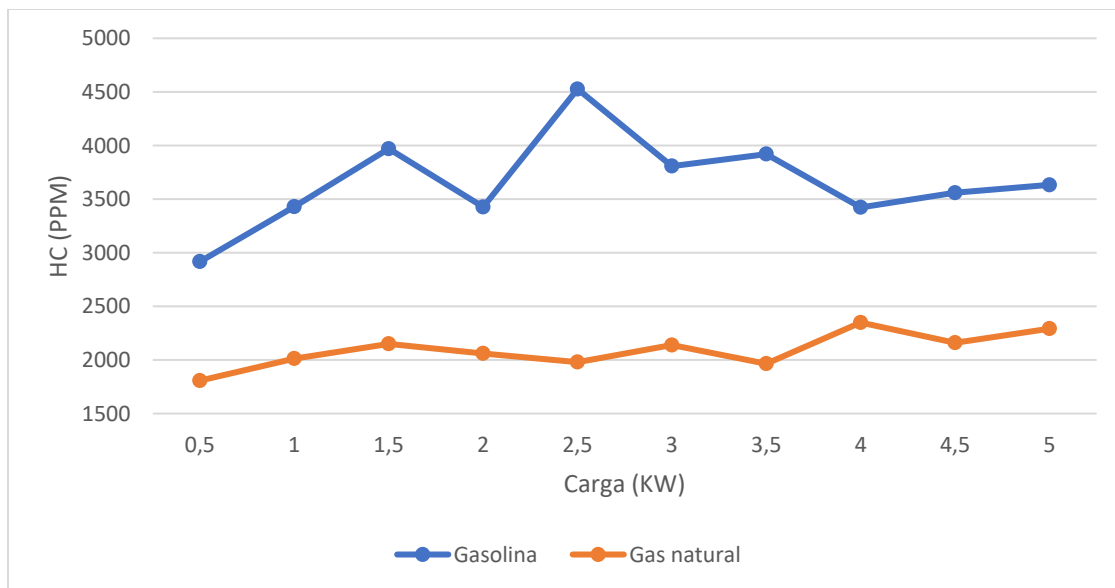
Se puede observar de la figura 26 que los valores en promedio de CO_2 producidos al trabajar con gasolina son aproximadamente un 58,7% mayores que al utilizar gas natural como

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

combustible. En consecuencia, se nota una mejor combustión al momento de trabajar con gasolina. También se evidencia que a medida que aumenta la carga y el tiempo de trabajo del grupo electrógeno los valores de CO_2 se estabilizan tanto para gasolina como para gas natural en un rango entre 4,0-6,0 % de volumen.

Figura 27

Hidrocarburos no quemados (HC) vs Carga



De la figura 27 se observa que al utilizar gasolina como combustible obtenemos cantidades de hidrocarburos no quemados superiores a 2500 ppm. Su punto de valor pico ocurrió al trabajar con una carga de 2500 w, correspondiente a 4527 ppm. A su vez este valor se encuentra por fuera del rango del punto alto del gas patrón. El comportamiento anteriormente mencionado sugiere una baja velocidad de inflamación (mezcla pobre) al utilizar gasolina.

Por otra parte, al utilizar gas natural obtenemos valores entre 1500-2500 ppm con un comportamiento ascendente a medida que aumentamos la carga y obteniendo su valor pico (2349 ppm) al trabajar a máxima carga (4000 w).

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los HC producidos por la gasolina en todos los niveles de carga fueron aproximadamente un 42,87% mayores que al trabajar con gas natural.

8.2 Consumo específico de combustible y potencia generada

En las pruebas de motor, el consumo de combustible se mide como caudal o flujo másico por unidad de tiempo. Un parámetro más útil es el consumo específico de combustible (sfc), que hace referencia a la tasa de flujo de combustible por unidad de potencia de salida. Lo anterior, permite medir la eficiencia con la que un motor utiliza el combustible suministrado para producir trabajo.

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Un parámetro fundamental para relacionar el trabajo producido por ciclo y la cantidad de energía de combustible suministrada que puede liberarse en el proceso de combustión se denomina “eficiencia”, aunque para discrepar de la eficiencia volumétrica y mecánica del motor también se adopta el nombre de eficiencia de conversión de combustible, que está definida por la siguiente ecuación. (Heywood, 1988).

$$n_f = \frac{1}{sfc * Q_{HV}}$$

Para la toma de datos de potencia generada y consumo de combustible se iniciaron los ensayos en la mínima carga que se le puede proporcionar al grupo electrógeno (500 watts) hasta llegar a la máxima carga posible (7000 watts), utilizando el tablero de bombillas. Posteriormente se calculó el consumo específico de combustible y eficiencia para cada valor de carga. Se consideró

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

un poder calorífico de $11,98 \text{ Kw} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ para el gas natural (Preciogas , s.f.) y $12,22 \text{ Kw} \cdot \text{h}/\text{kg}$ para la gasolina.

Tabla 13

Resultados potencia generada y consumo de combustible utilizando gas natural como combustible

Datos para el análisis de la eficiencia con gas natural				
Carga [w]	Potencia generada (w)	Q (m ³ /h)	sfc (m ³ /kwh)	nf (%)
500	266,6	1,19	4,49	1,85
1000	463,3	1,21	2,63	3,17
1500	633,3	1,21	1,91	4,35
2000	776,6	1,22	1,58	5,27
2500	956,6	1,20	1,26	6,61
3000	1016,6	1,19	1,17	7,10
3500	946,6	1,22	1,29	6,44
4000	1146,6	1,24	1,10	7,7
4500	1286,6	1,19	0,93	8,95
5000	1433,3	1,22	0,86	9,75

Tabla 14

Resultados potencia generada y consumo de combustible utilizando gasolina

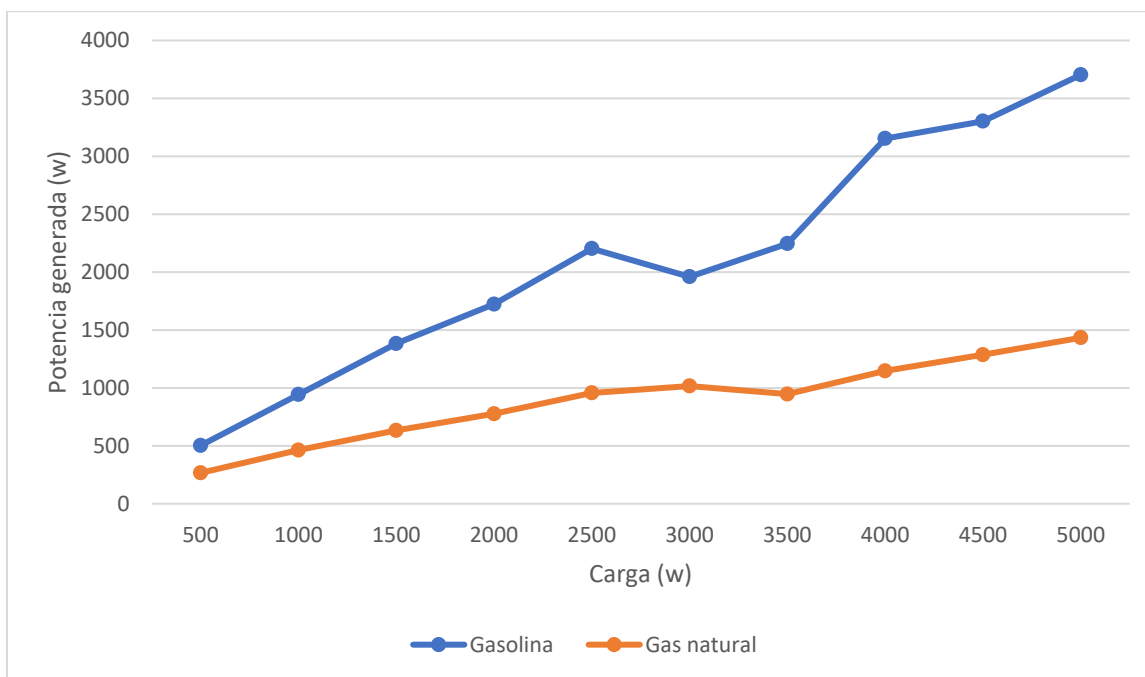
Datos para el análisis de la eficiencia con gasolina				
Carga [w]	Potencia generada (w)	Q (Kg/h)	sfc (Kg/kwh)	nf (%)
500	503,3	2,98	5,93	1,75
1000	943,3	3,28	3,49	2,97
1500	1383,3	3,1	2,25	4,61
2000	1723,3	3,17	1,84	5,64
2500	2203,3	3,38	1,54	6,74
3000	1960	3,53	1,8	5,76
3500	2246	3,3	1,47	7,06
4000	3153,3	3,87	1,23	8,43
4500	3303	3,48	1,06	9,78
5000	3703,3	4	1,08	9,60

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Para la toma de datos de potencia y consumo con gasolina se trabajó hasta un valor de carga de 5000 w dejando de utilizar una bombilla de 1000w por cada fase ya que durante el desarrollo de las pruebas al someter al grupo electrógeno a valores de carga más altos se producía el salto de los disyuntores de seguridad del generador.

Figura 28

Potencia generada (W) vs Carga



Teniendo en cuenta que el grupo electrógeno por defecto utiliza gasolina como combustible se tomara como referencia la potencia generada con este combustible, de este modo se observa que el gas natural apenas alcanzó un 38,70 % de la potencia máxima generada con la gasolina, el valor porcentual obtenido se registró al mismo nivel de carga de ambos combustibles.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los valores de potencia generada obtenidos con gas natural tienden a estabilizarse a partir del valor de carga de 2500 watts en un rango de 900-1490 watts.

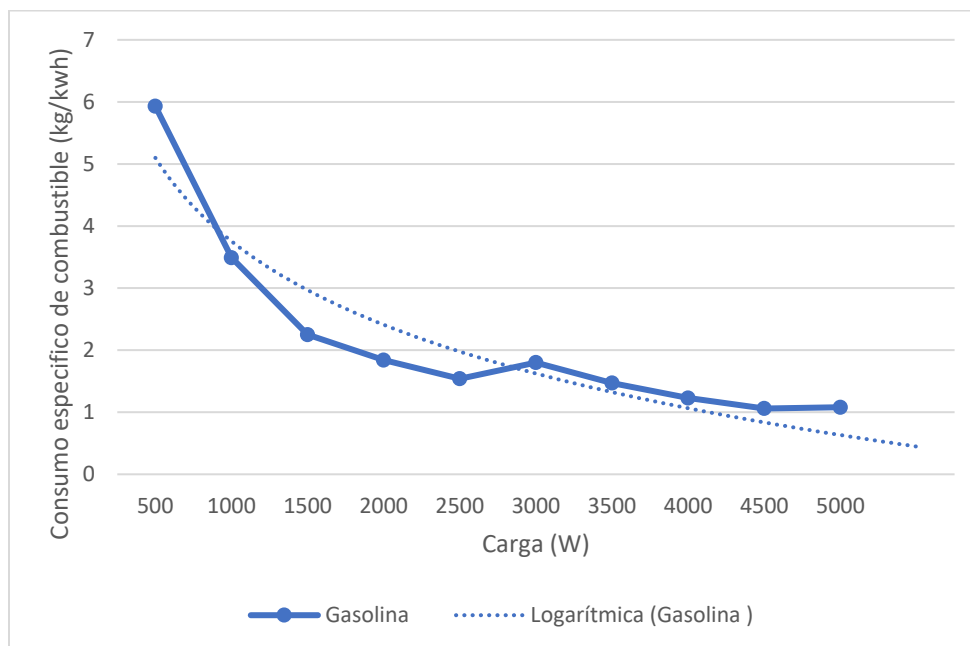
El valor máximo de potencia generada se obtiene al trabajar con gasolina con una carga de 5000 w y corresponde a un 74,06 % de valor de la carga impuesta.

Unas explicaciones de las bajas potencias obtenidas del gas natural pueden estar relacionadas a la baja presión en el suministro de combustible, aunque hay otros factores que afectan el proceso como la eficiencia volumétrica del motor al ser necesario suministrar más combustible en la cámara para producir la misma potencia y el ángulo de ignición de la chispa el cual no fue modificado durante las pruebas y por tanto está ajustado para los tiempos de funcionamiento con gasolina.

Las gráficas de consumo específico de combustible se realizaron por aparte para cada combustible, ya que se trabajan unidades diferentes.

Figura 29

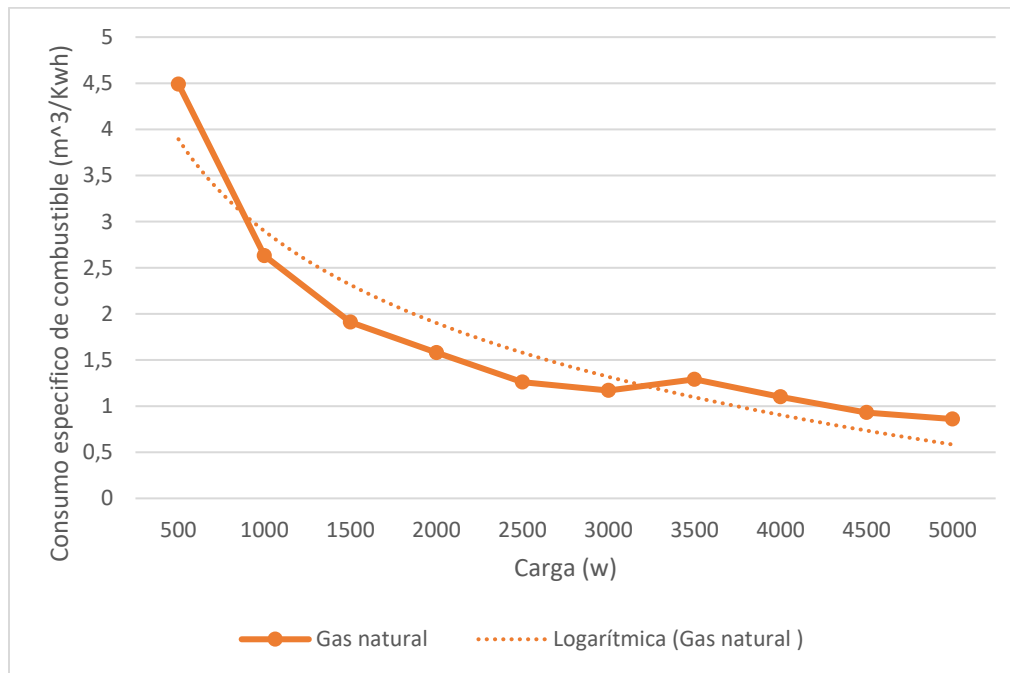
Consumo específico de combustible (kg/kwh) vs Carga con gasolina



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 30

Consumo específico de combustible (m³/kwh) vs Carga con gas natural

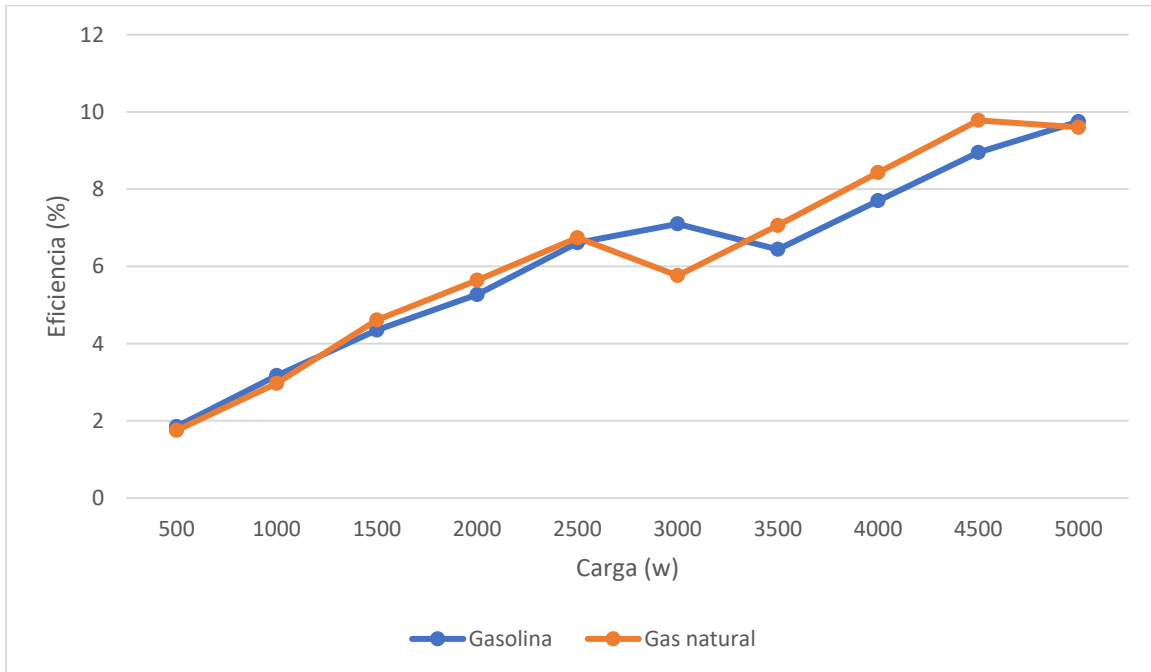


En las figuras 29 y 30 se evidencia que el consumo específico de combustible aumenta para ambos combustibles a medida que se reduce la carga al grupo electrógeno, los valores máximos de *sfc* se obtienen en el primer de carga (500 w) y corresponden a $4,49 \frac{m^3}{Kw*h}$ para gas natural y $5,93 \frac{Kg}{Kw*h}$ para gasolina.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 31

Eficiencia total (%) vs Carga



De la figura 31. Se observa que el valor máximo de eficiencia de conversión de combustible con gasolina es del 9,78 %, obtenido cuando se trabaja con una carga de 4500w y el máximo valor de eficiencia con gas natural 9,75 % obtenido cuando se trabaja a 5000 w de carga.

Se observa que tanto para gasolina como para gas natural los valores mínimos de eficiencia se encuentran al iniciar con la carga mínima (500 w) los cuales corresponden a 1,75% y 1,85% respectivamente.

En este tipo de grupos de electrógenos evidencia una mayor eficiencia al trabajar con valores altos de carga impuesta.

Aunque lo ideal es aprovechar la mayor cantidad de energía almacenada en el combustible se debe tener en cuenta que la eficiencia total de conversión de energía está afectada por otros factores como la pérdida de eficiencia del generador que es alrededor de un 5%, la pérdida de

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

potencia debido a la altura sobre el nivel del mar que corresponde a un 10 % por cada 1000 de altitud. (Motor , 2016).

9. Protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno

Las precauciones de seguridad son esenciales cuando se implementa cualquier equipo eléctrico o mecánico, con el debido cuidado se disminuirá las posibilidades de lesiones personales. Antes de realizar cualquier práctica se recomienda realizar un diagnóstico para el grupo electrógeno donde se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La carga del equipo debe mantenerse dentro de la clasificación indicada en la placa, una sobrecarga dañará y disminuirá la vida útil del equipo.
- Cuando el motor opera a velocidades excesivas aumenta el riesgo de lesiones personales, además no se recomienda manipular con partes que puedan aumentar o disminuir la velocidad de operación.
- Los grupos electrógenos no deben ser operados ni almacenados en lugares altamente húmedos. Tampoco deben ser operados en ubicaciones conductoras como cubiertas metálicas.
- Es obligatorio el uso de los elementos de seguridad como se observa en la figura 32, el estudiante debe traer para la práctica bata o braga, protección para los oídos, gafas y botas

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

de seguridad o calzado de material cerrado, también se debe hacer uso de los guantes de carnaza y tapabocas suministrado en el laboratorio.

Figura 32

Elementos de seguridad



- Mantener el generador siempre limpio, libre de aceite, barro y otras sustancias extrañas.
- Verificar que los cables de extensión, los cables de alimentación y todo el equipo eléctrico se encuentren en buen estado. Nunca operar equipos electrónicos con componentes dañados o defectuosos.
- El generador nunca debe ser operado cuando se presentan las siguientes condiciones:

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

- ✓ Cambio abrupto de la velocidad del motor.
 - ✓ Sobrecalentamiento en equipos conectados.
 - ✓ Chispas.
 - ✓ Recipientes dañados.
 - ✓ Fallo en el encendido del motor.
 - ✓ Vibración excesiva.
 - ✓ Llama o humo.
- Revisar periódicamente el sistema de combustible para detectar posibles fugas o signos de deterioro como: mangueras irritadas o esponjosas, abrazaderas sueltas o faltantes. Todos los defectos deben corregirse antes de la operación.
 - El generador debe ser operado, reparado y reabastecido de combustible solo bajo las siguientes condiciones:
 - ✓ En lugares con buena ventilación, evitando áreas donde los vapores puedan quedar atrapados, como pozos, sótanos, bodegas, excavaciones. La temperatura no debe exceder los 40°C.
 - ✓ Los gases de escape son peligrosos. En áreas cerradas se deben canalizar, ya que el escape del motor contiene monóxido de carbono, un gas invisible, venenoso e inodoro, que si se respira puede causar graves enfermedades, incluso la muerte.
 - ✓ Recargue de combustible el generador en un área bien iluminada. Evite derrames de combustible y nunca recargar cuando el generador esté funcionando. No recargar cerca de llamas abiertas, luces piloto, o chispas eléctricas producidas por equipos como herramientas eléctricas, soldadores y amoladoras.
 - ✓ El silenciador y el filtro de aire deben estar instalados en buenas condiciones todo el tiempo, ya que una de sus funciones es servir de apagallamas, si se produce un contragolpe.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

- No use ropa holgada, joyería o cualquier cosa que pueda quedar atrapada en el arrancador u otras piezas giratorias.
- Al apagar el motor primero desconecte las cargas.
- No pegue nada a través de las ranuras de ventilación, incluso cuando el generador no está funcionando. Esto puede dañar el generador o causar algún accidente.

9.1 Arranque del grupo electrógeno

Siga los siguientes pasos para encender el grupo electrógeno:

1. Prenda el extractor de gases, y el ventilador del LMTA, en la figura 33 se observan sus interruptores.

Figura 33

Interruptores para los equipos de extracción de gases del LMTA.



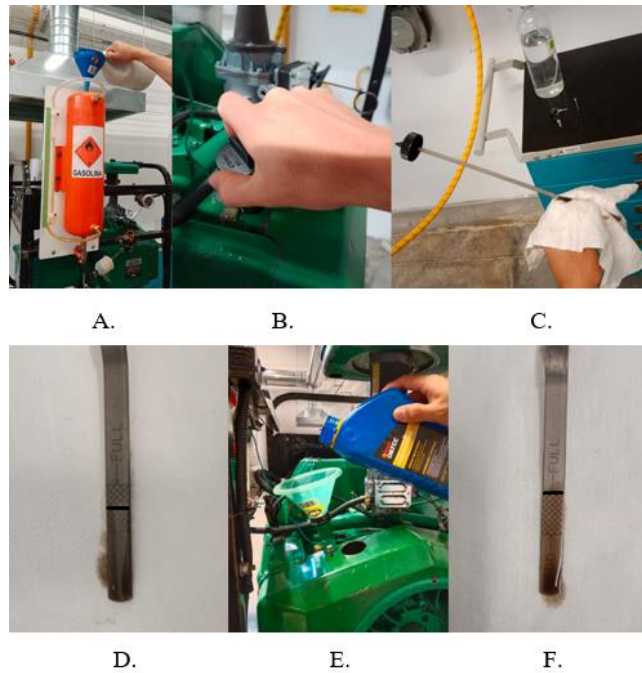
Nota. El botón verde es para el encendido y el botón rojo para el apagado.

2. Compruebe el nivel de aceite y combustible como se ilustra en la figura 34.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 34

Revisión del nivel de aceite y combustible.



Nota. En la sección A se observa el tanque de suministro de gasolina, al lado derecho se revisa el nivel de combustible, y por la parte superior del tanque se ingresa el combustible. Para la revisión del nivel de aceite primero se desenrosca el nivel de aceite como se observa en la sección B, luego se limpia el nivel de aceite como se observa en la sección C, si hace falta aceite como se observa en la sección D es necesario que adicione aceite como se muestra en la sección E y por último después de volver a limpiar el nivel de aceite se debe asegurar que el equipo cuente con el nivel de aceite adecuado como se muestra en la sección F.

3. Desconecte todas las cargas eléctricas de la unidad, el panel de control debe estar libere como se observa en la figura 35.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 35

Panel de control del grupo electrógeno

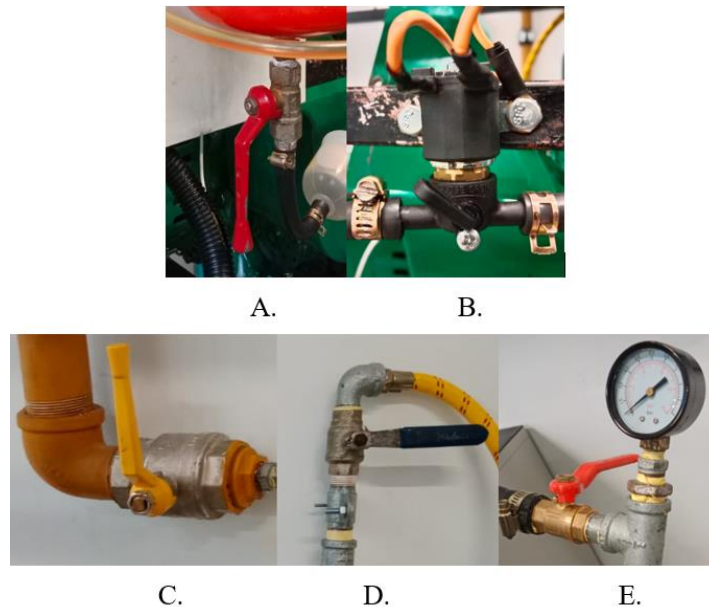


Nota. A. interruptor on-off-on utilizado para conmutar los combustibles, B. interruptor de encendido y apagado del equipo, C. tomacorriente doble de 120 voltios /20 Amperios, D. toma corriente de bloque de torsión a 120 voltios /30 Amperios, E. disyuntores, F. toma corriente de bloque de torsión a 240 voltios /30 Amperios.

4. Verifique que las llaves que dan paso al combustible (ver figura 36) estén abiertas.

Figura 36

Llaves que dan paso al combustible



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Nota. Las llaves que dan paso a la gasolina son la A y B, en esta imagen la llave A se observa abierta, la electroválvula B se encuentra en su posición normal de funcionamiento y las llaves de bola C, D y E dan paso al GNC, las cuales se observan cerradas en la figura.

5. Mueva el interruptor, para iniciar el equipo con gasolina como se observa en la figura 37.

Figura 37

Electroválvula de gasolina activada



6. Gire la llave a *START en el interruptor B. ilustrado en la figura 38.

Figura 38

Encendido del motor



7. El motor siempre se inicia con gasolina. Si se desea trabajar con gas, simplemente se conmuta a gas con el interruptor ilustrado en la figura 39, después de un tiempo prudente de haber iniciado con gasolina.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 39

Electroválvula de gas activada



8. Permita que el generador funcione sin carga por cinco minutos después de cada puesta en marcha, para permitir que el motor y generador se estabilicen.
9. Conecte el tablero de consumo al tomacorriente de 240 voltios a 30 amperios como en la figura 40.

Figura 40

Conexión del tablero de consumo



A.

B.

Nota. En la sección A se observa el tablero de consumo, y en la sección B la conexión del tablero de consumo al panel de control del generador

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

9.2 Apagado del grupo electrógeno

Para apagar el grupo electrógeno siga los siguientes pasos:

1. Remover la carga eléctrica, ver figura 41.

Figura 41

Tablero de control carga y panel del generador



Nota. Para remover la carga primero se deben ubicar los interruptores del tablero de consumo en la posición off como se observa en la imagen y luego se retira el toma corriente.

2. Deje que el motor funcione durante unos minutos más.
3. Gire la llave a *OFF en el interruptor ilustrado en la figura 42.

Figura 42

Apagado del grupo electrógeno



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

4. No deje el generador hasta que se haya detenido por completo.
5. Cierre las válvulas que dan paso al combustible (ver figura 36) al terminar las practicas.

9.3 Protección de circuitos

Los tomacorrientes están protegidos por un interruptor AC. Si el generador está sobrecargado o se produce un cortocircuito, los disyuntores que se observan en la figura 43 se dispararán. Si esto ocurre, desconecte todas las cargas eléctricas e intente determinar la causa del problema antes de intentar utilizar el generador otra vez. Si la sobrecarga hace que el disyuntor se dispare reduzca la carga. El disparo continuo del interruptor puede causar daños al generador o equipo. El interruptor se puede restablecer presionando el botón del disyuntor E (Powermate s.f.).

Figura 43

Disyuntores de seguridad del generador



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

9.4 Servicio poco frecuente

Si la unidad se usa con poca frecuencia, puede resultar ser difícil arrancar, Para eliminar La dificultad del arranque, se debe hacer funcionar el generador al menos 30 minutos cada semana. Además, si la unidad no se utilizara por algún tiempo, es una buena idea drenar el combustible del carburador y del tanque.

9.5 Almacenamiento a largo plazo

Cuando el grupo electrógeno no esté funcionando o se deje quieto por más de un mes, siga estas instrucciones:

1. Reponga el aceite del motor al nivel superior indicado en la figura 44.

Figura 44

Nivel superior de aceite



2. Drene la gasolina del tanque de combustible, la línea de combustible, la válvula de combustible y el carburador como se indica en la figura 45.

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Figura 45

Drenaje de combustible estancado



Nota. Para el drenaje de las líneas de combustible se debe utilizar el alicate para soltar las abrazaderas de presión. Para drenar el combustible estancado en el carburador se retira el tapon de drenaje que se observa en la figura con ayuda de una llave de un volvedor y una copa de $\frac{3}{4}$ in.

3. Vierta aproximadamente una cucharadita de aceite de motor a través del orificio de la bujía.

Figura 46

Desmonte de bujía



ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Nota. Para retirar la bujía en el LMTA se puede hacer uso de la copa de 13/16 in alta, con ayuda de una llave de 23mm. No se utiliza volvedor para la copa ya que la altura de la bujía no lo permite.

4. Cubra la unidad y guárdela en un lugar limpio y seco que esté bien ventilado lejos de llamas abiertas o chispas.

Nota: El uso de un aditivo de combustible, como STA-BIL, o un equivalente, minimiza la formulación de depósitos de goma de combustible durante. El almacenamiento, el aditivo puede añadirse a la gasolina en el depósito de combustible del motor, o a la gasolina en un recipiente de almacenamiento.

Para cumplir con los protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno se desarrollaron unas prácticas descritas en la Cartilla de las prácticas de laboratorio del grupo electrógeno Powermate Coleman 7000 (Anexo E)

Conclusiones

- La investigación dentro de los conocimientos de la ingeniería mecánica, puso en uso conocimientos que condujeron a la adaptación de un mezclador tipo Venturi para el suministro de combustibles gaseosos a un motor de combustión interna basado en la metodología de diseño descrita por John R Agudelo y Ricardo Mejía, la cual proporciona el dimensionamiento del área de la garganta ($211,3 \text{ mm}^2$) y el área de descarga del gas ($8,2 \text{ mm}^2$), parámetros principales para la fabricación del dispositivo mezclador.
- En la tabla de emisiones de gases se observa que al funcionar con gas natural se obtienen valores de lambda superiores a 2,14 lo cual está asociado directamente a la presión de suministro de gas en el laboratorio que corresponde a 5 Psi aproximadamente y conlleva a una mejora notable en la composición de las emisiones de escape, aunque este beneficio se ve disminuido por las bajas potencias generadas ya que corresponden apenas a un 20,48 % de la potencia nominal del generador y un 10,68 % de la potencia del motor.
- Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se evidenció la falta de una conexión directa del exosto al sistema de extracción de gases ya que como se encuentra actualmente no alcanza a succionar la totalidad de los gases, pues deja residuos en el ambiente, lo que es nocivo para la salud.
- Una vez logrado el cometido de este trabajo de grado, en cuanto a la potencia del motor, si bien el objetivo de la investigación no apuntaba a la mejora del rendimiento del motor, se pudo identificar que la potencia generada alcanza valores del 27,6% aproximadamente del

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

valor máximo de potencia nominal. Esta pérdida significativa en el rendimiento del equipo estar relacionada con varios factores como el cambio del carburador original, altura sobre el nivel del mar a la cual se opere, última reparación general del motor, acople del mezclador y falta de operación

- En lo concerniente al regulador Lovato se pudo identificar que se utiliza únicamente como válvula en el proceso de conmutación de gasolina a gas natural esto debido a la baja presión en la línea de suministro de gas natural aproximadamente de 5 Psi ya que este tipo de reguladores trabajan con presiones de entrada de 2900 Psi aproximadamente.
- Para dar cumplimiento con el objetivo 3 se desarrolló una cartilla para las prácticas de laboratorio, la cual se divide en tres capítulos. En el primer capítulo se encuentran los protocolos de prevención y operación del grupo electrógeno. En el segundo capítulo se encuentra la práctica de identificación del grupo electrógeno. En el tercer capítulo contiene la práctica de consumo específico de combustible y potencia generada y el cuarto capítulo contiene la práctica de emisiones de escape.

Recomendaciones

- El mezclador tipo Venturi adaptado al grupo electrógeno se basa en un modelo netamente teórico. Se considera relevante adelantar investigaciones futuras con el fin de optimizar el funcionamiento mediante simulación CFD.
- Al momento de realizar las prácticas de laboratorio, es necesario cumplir con los protocolos y normativa anteriormente mencionados además de contar con el acompañamiento de un auxiliar el cual tenga conocimiento previo del funcionamiento del grupo electrógeno.
- Es necesario realizar las tareas de mantenimiento descritas en el presente trabajo con el fin de evitar daños o fallas graves en el equipo, teniendo en cuenta además que el grupo electrógeno es un poco antiguo.
- Debido a la complejidad del desarrollo de las pruebas experimentales del grupo electrógeno, se recomienda adelantar investigaciones futuras para la automatización de la toma de datos con diferentes sensores y un sistema de registro de datos.

Referencias bibliográficas

- Agudelo , J., & Mejía , R. (2002). Desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores. *Facultad de Ingeniería*, 54-67.
- Apaza Katata, M. T. (2021). Evaluacion de desempeño de un motor de combustión interna otto usando como combustible biometano presurizado en un generador eléctrica. *Tesis*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- Ariza, J. F., & Ramírez, L. G. (2012). Diagnostico, puesta en marcha e implementación de las prácticas experimentales de un grupo electrógeno del laboratorio de máquinas térmicas alternativas . *Trabajo de investigación* . Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga , Colombia.
- ASME. (2004). *Measurement od Fluid Flow in Pipes Using Orifece, Nozzle, and Venturi ASME MFC-3M*. New York: The American Society of Mechanical Engineers .
- Briggs&Stratton. (2007). Operating & Maintenance Instructions Model Series 420000. *Instrucciones de operación y mantenimiento*. U.S.A.
- Brizuela, E., & Romano, S. (2003). *67.30 Combustión* . Buenos Aires: Departamento de ingeniería Mecánica y Naval, Facultad de ingeniería, UBA .
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2004). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. México: McGraw-hill.
- Coleman Powermate, I. (s.f). Operator's Manual Commercial Series ELECTRIC GENERATOR. *Manual*. Coleman, Kearney, Nebraska, United States.
- De Maquinas y Herramientas. (s.f). *¿ Como funciona y se usa correctamente un generador o grupo electrógeno?* Obtenido de demaquinasyherramientas.com:

ADAPTACIÓN DE MOTOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

<https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/como-funciona-grupo-electrogeno-o-generator>

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York : TATA McGRAW-HILL EDITION.

Kirkpatrick, A. (2007). *Internal Combustion Engine Thermodynamics*. Obtenido de <https://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page1/page1f.html>

Mitzlaff, K. V. (1988). *Engines for biogas : theory, modification, economic operation*. F. Vieweg.

Molina, F. J. (2021). Adaptación y evaluación del desempeño de un generador eléctrico utilizando biogás como combustible. *Trabajo de investigación*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia .

Motor . (14 de 12 de 2016). *JUEVES DE MECÁNICA I: LA ALTURA AFECTA A LOS MOTORES* . Obtenido de <https://www.motor.com.co/industria/Jueves-de-mecanica-I-La-altura-afecta-a-los-motores-20161214-0007.html>

Plaza, D. (2021). *Motor.es*. Obtenido de Motor.es: <https://www.motor.es/que-es/factor-lambda>

Preciogas . (s.f.). Obtenido de Preciogas : <https://preciogas.com/instalaciones/gas-natural/composicion>

Torres, F. O. (2019). Análisis de la potencia generada y de los gases de escape de un grupo electrógeno usando como combustible una mezcla de gasolina-biogás. *Trabajo de investigación*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander , Colombia .

Upp, E., & La Nasa, P. (2002). *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. Gulf Professional Pub.