



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio y evaluación del comportamiento energético del motor de un conjunto motogenerador operando con Gas Licuado de Petróleo (GLP) de alto butano

Vladimir Silva Leal

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2014

Estudio y evaluación del comportamiento energético del motor de un conjunto motogenerador operando con Gas Licuado de Petróleo (GLP) de alto butano

Vladimir Silva Leal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Mecánica

Director:
Ph.D.(c), Msc, Ing. Jorge Eduardo Arango Gómez

Línea de Investigación:
Ciencias Térmicas y Motores de Combustión Interna
Grupo de Investigación:
Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2014

Dedicatoria

A mi esposa Jaidive Duque a quien amo con todo mi corazón por su apoyo incondicional, quien estuvo todo el tiempo colaborándome motivándome y acompañándome en este proceso.

“La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones”.

Albert Einstein

Agradecimientos

A mi Esposa Jaidive Duque, mi hijos, mis padres y a mis hermanos por brindarme su apoyo a través de todo este tiempo.

A mi director de tesis, ingeniero Jorge Eduardo Arango por su valiosa guía y asesoría durante todo este proceso así como también por la confianza depositada en mí.

Al Ingeniero Eric Dávila de la empresa ESEI SAS, por su valiosa colaboración en el desarrollo de las pruebas, así como la implementación logística y sitio de montaje de pruebas

A los ingenieros Edgar Cifuentes y Anthony Solano de la empresa POILGAS por su colaboración y préstamo de motogenerador Waukesha, así como el suministro de información complementaria del control del equipo.

A los miembros del Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, por el apoyo dedicado al correcto desarrollo de esta investigación, aportando comentarios y sugerencias basadas en su conocimiento y experiencia en cuanto al desarrollo teórico y experimental de tan interesante tema.

Resumen

El presente documento muestra un panorama nacional e internacional sobre el uso del GLP como combustible y su potencial en la generación de electricidad, aplicando a un motogenerador marca Waukesha diseñado originalmente para gas natural el GLP de Cusiana; con alto nivel de butano y de difícil utilización en generación de energía eléctrica para campos petroleros debido a su alta densidad y difícil vaporización. Teniendo en cuenta que en Colombia el Gas Licuado de Petróleo (GLP) es un combustible gaseoso que se obtiene mediante el proceso de refinación y como un subproducto de las corrientes de gas natural en diferentes campos de extracción y que se dispone de un alto nivel de producción de GLP de diferentes calidades, se busca promover su uso junto con otros combustibles disponibles ampliamente como recurso energético en nuestro país para regular la canasta energética Colombiana, caracterizada por el alto precio de los combustibles. Se realiza el balance energético del motor sin modificaciones, siguiendo un protocolo de prueba basado en normatividad internacional sobre motogeneradores e identificando la necesidad de ciertos ajustes. Buscando obtener un mejor comportamiento energético con este combustible se prueba el ajuste de ciertos parámetros observándose el impacto en la eficiencia. El ajuste de los parámetros del motor del motogenerador para su operación más eficientemente con GLP, abre la oportunidad de continuar con esta investigación para su posible uso tanto en campos petroleros como en zonas las apartadas del país.

Palabras Clave: Gas licuado de petróleo, protocolo de pruebas, eficiencia mecánica, balance de energía, motor de encendido provocado, motogenerador.

Abstract

The present research shows a national and international scene on the use of LPG as a fuel and its potential in generating electricity, using a brand Waukesha engine generator originally designed for natural gas LPG Cusiana; with high butane and difficult to use in power generation to oil fields because of its high density and vaporization difficult. Considering that in Colombia the Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a gaseous fuel that is produced through the refining process and as a byproduct of natural gas streams at different extraction fields and that you have a high level of LPG production of different qualities, seeks to promote its use with other fuels as an energy source widely available in our country to regulate the energy basket Colombiana, characterized by high fuel prices. The energy balance of the engine without modifications is performed following a test protocol based on international standards on motor generators and identifying the need for certain adjustments. Looking to get a better energy performance with this test fuel adjusting certain parameters observing the impact on efficiency. The parameter setting motor generator motor to operate more efficiently with GLP, opens the opportunity to continue this investigation for possible use in both oil fields and in remote areas of the country.

Keywords: Liquefied petroleum gas, protocol testing, mechanical efficiency, energy balance, spark ignition engine, generating sets.

Tabla de Contenido

Resumen	IV
Abstract	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	IX
1. Introducción	1
1.1 Alcance.....	2
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Metodología	3
2. Planteamiento del Problema	4
2.1 Formulación del Problema	4
2.2 Descripción del Problema.....	4
3. Estado del Arte y Revisión Bibliográfica	8
3.1 Generalidades del GLP como combustible	8
3.2 El GLP en el mundo	12
3.3 El GLP en Colombia	13
3.4 Caracterización de GLP de Cusiana.....	14
3.4.1 Vaporización natural de GLP de Cusiana	17
3.4.2 Resultados de Cromatografía.....	19
3.5 Características físico-químicas del GLP de Cusiana utilizado en las pruebas.....	22
3.6 Introducción a los motogeneradores	23
3.6.1 Combustibles para motogeneradores	24
3.7 Generación de Energía Eléctrica en Campos Petroleros.....	30
3.8 Antecedentes uso de GLP en generación de energía en Colombia	31
3.9 Normatividad Internacional para Motores de Combustión Interna	33
3.10 Variables que afectan el comportamiento energético de los MEP	34
3.10.1 Fundamentos de combustión	34
3.10.2 Avance de encendido en MEP.....	37
3.10.3 Riqueza de mezcla en MEP.....	39
4. Reconocimiento del equipo y Ejecución de la prueba	41
4.1 Sitio de Pruebas	41
4.2 Montaje	43
4.3 Instrumentación y Adquisición de Datos	53
5. Ejecución de las pruebas bajo protocolo	60

5.1 Parámetros monitoreados	60
5.2 Protocolo de pruebas	60
6. Análisis de Resultados	62
6.1 Prueba de motogenerador con GLP de Cusiana bajo ajuste de parámetros de Gas Natural.	62
6.1.1 Eficiencia de Generación para motogenerador Waukesha	62
6.1.2 Balance de Masa y Energía de Motogenerador Waukesha	68
6.1.3 Análisis de productos de la combustión	70
6.1.4 Evaluación energética del sistema y pérdidas por gases de escape.....	77
7. Conclusiones.....	88
8. Recomendaciones	89
9. Anexos.....	90
A. Anexo: Ficha técnica motogenerador Waukesha	92
B. Anexo: Catálogo medidor de flujo Optiswirl 4070	93
C. Anexo: Certificados de calibración flujómetrosVortexOptiswirl 4070/C No D***3494	94
D. Anexo : Certificado de calibración flujómetros VortexOptiswirl 4070/C No D***5847	95
E. Anexo: Descripción Portable Gas3100P SyngasAnalyser	96
F. Anexo: Especificaciones técnicas Analizador Bacharach modelo 300	97
10. Bibliografía	98

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Demanda final de energía en Colombia – Balances energéticos UPME Años 2011-2012.....</i>	4
<i>Figura 2: Demanda de derivados de petróleo en Colombia, año 2009.....</i>	5
<i>Figura 3: Balance Energético Nacional de Colombia en los últimos 20 años.....</i>	6
<i>Figura 4: Molécula de gas propano.....</i>	9
<i>Figura 5: Molécula de gas butano.....</i>	9
<i>Figura 6: Planta de operación Cusiana.....</i>	15
<i>Figura 7: Composición de GLP por fuente de suministro.....</i>	17
<i>Figura 8: Cisterna de almacenamiento de GLP con volumen de líquido y espacio para gas.....</i>	18
<i>Figura 9: Evaporación natural de GLP.....</i>	19
<i>Figura 10: Motogenerador portátil.....</i>	26
<i>Figura 11: Vista seleccionada de un motor Diésel de 4 tiempos refrigerado por agua.</i>	28
<i>Figura 12: Sistema de combustible combinado.....</i>	29
<i>Figura 13: Curvas de consumo medio de combustible de un grupo de.....</i>	29
<i>Figura 14: Evolución de la presión máxima y la pme en función del avance de encendido a régimen y grado de admisión constantes. Fuente: Libro – Motores de Combustión Interna Alternativos de F. Payri y J.M. Desantes.....</i>	37
<i>Figura 15: Ubicación geográfica del lugar de la prueba (Ecopetrol S.A. Complejo Mansilla Facatativá, Cundinamarca).</i>	41
<i>Figura 16: Imagen del sitio donde se realizó en montaje para la prueba de generación con GLP de Cusiana.....</i>	42
<i>Figura 17: Rotonda de carga de camiones cisterna de GLP en Alsbana Instalaciones de Ecopetrol Complejo Mansilla.....</i>	42
<i>Figura 18: Montaje general para el desarrollo de la prueba a motogenerador Waukesha.....</i>	43
<i>Figura 19: Montaje general de pruebas de motogenerador Waukesha con GLP de alto butano de Cusiana.....</i>	44
<i>Figura 20: Conexión de manguera de 2" a cisterna de 11000 galones de GLP de alto butano.....</i>	45
<i>Figura 21: Rotogage de tanque de almacenamiento de GLP.....</i>	46
<i>Figura 22: Conexión de Cisterna de GLP con tanque pulmón homogenizador de presión y verificación de rotogage de cisterna de almacenamiento de GLP.....</i>	46
<i>Figura 23: Regulador de presión en paralelo de GLP.....</i>	47
<i>Figura 24: Medidor de flujo másico para gas Vortex.....</i>	48
<i>Figura 25: Descripción de Motogenerador Waukesha Cabinado (Blanco) con radiador, exhosto y silenciador (Negro).....</i>	49
<i>Figura 26: Motogenerador Waukesha acoplado a radiador.....</i>	49
<i>Figura 27: Detalle interno de motogenerador Waukesha acoplamiento motor - generador.....</i>	50
<i>Figura 28: Instalación de medidor de flujo másico para gas Vortex.....</i>	51
<i>Figura 29: Montaje de sistema de adquisición de datos (National Instruments).....</i>	51
<i>Figura 30: Banco de carga resistivo de 1 MW.....</i>	52
<i>Figura 31: Analizador de red (Fluke) conectado y recibiendo señal de banco de carga.....</i>	52

<i>Figura 32: Analizador de gases bacharac.....</i>	54
<i>Figura 33: Analizador de redes.....</i>	54
<i>Figura 34: Anemometro de hilo caliente y pirómetro.....</i>	55
<i>Figura 35: Linea de Suministro de GLP.....</i>	55
<i>Figura 36: Manometro presion de cumbustible y de aire.....</i>	56
<i>Figura 37: Medidor de Flujo Masico.....</i>	56
<i>Figura 38: Medidor de temperatura Ambiente y Humedad relativa.....</i>	57
<i>Figura 39: Sensor vortex.....</i>	57
<i>Figura 40: Sistema de adquisicion de datos.....</i>	58
<i>Figura 41: Software de unidad de control electronico para avance de encendido.....</i>	58
<i>Figura 42: Toma de muestra para cromatografia.....</i>	59
<i>Figura 43: Tornillo de regulacion de caudal del cumbustible.....</i>	59
<i>Figura 26: Variación de condiciones de carga según protocolo de pruebas para motogenerador Waukesha.....</i>	63
<i>Figura 27: Consumo de GLP de alto butano en función de la carga eléctrica generada.....</i>	64
<i>Figura 28: Línea de Willan para motogenerador Waukesha alimentado con GLP de alto butano.....</i>	65
<i>Figura 29: Comportamiento de Eficiencia de generación para motogenerador y potencia del combustible aplicada.....</i>	66
<i>Figura 30: Curva de eficiencia térmica de motor Waukesha para potencia indicada.....</i>	68
<i>Figura 31: Planteamiento de balance de energía para motogenerador Waukesha.....</i>	69
<i>Figura 32: Relación de las temperaturas de los gases de escape y aire admisión con potencia generada para uso de GLP con parámetros de gas natural.....</i>	70
<i>Figura 33: Lugar de ingreso de aire al motogenerador Waukesha.....</i>	72
<i>Figura 34: Niveles de CO2 generados en las emisiones en función de la potencia eléctrica motor Waukesha.....</i>	76
<i>Figura 35: Niveles de CO generados en las emisiones en función de la potencia eléctrica motor Waukesha.....</i>	77
<i>Figura 39: Niveles de material no-quemado en las emisiones en función de la potencia eléctrica y relación equivalencia motor Waukesha.....</i>	77
<i>Figura 36: Distribución de la potencia térmica de alimentación y las pérdidas energéticas como calor sensible y compuestos derivados de la combustión incompleta en el motor Waukesha.....</i>	78
<i>Figura 37: Distribución energética para el motogenerador Waukesha operado a máxima carga con GLP.....</i>	79

Lista de Tablas

<i>Tabla 1: Relación butano propano de GLP utilizado en el mundo.....</i>	7
<i>Tabla 2: Características generales de un Butano comercial.....</i>	10
<i>Tabla 3: Características generales de un Propano comercial.....</i>	10
<i>Tabla 4: Producción Colombiana de GLP por fuente de suministro en barriles por día.....</i>	14
<i>Tabla 5: Cromatografía de GLP en estado líquido de Campo Cusiana utilizado en las pruebas de motogenerador.....</i>	20
<i>Tabla 6: Cromatografía de GLP en estado gaseoso de Campo Cusiana utilizado en las pruebas de motogenerador.....</i>	21
<i>Tabla 7 Propiedades fisicoquímicas consideradas para el GLP con base en resultados de la cromatografía.....</i>	22
<i>Tabla 8 Poder calorífico superior e inferior calculado con base en densidad real a condiciones estándar.....</i>	23
<i>Tabla 9: potencias caloríficas de los combustibles más comunes.....</i>	25
<i>Tabla 7: Mediciones de consumo de combustible en función de la potencia eléctrica generada.....</i>	63
<i>Tabla 8: Datos de eficiencia de generación de energía eléctrica en función de la potencia del combustible.....</i>	65
<i>Tabla 9: Valores de eficiencia de motor teniendo en cuenta la potencia indicada.....</i>	67
<i>Tabla 10: Resumen resultados de emisiones reportados durante prueba motogenerador Waukesha.....</i>	74
<i>Tabla 11: Emisiones generadas por el motogenerador Waukesha separadas por componente.....</i>	74
<i>Tabla 12:Flujos de combustible, aire y gases de combustión generados en ensayo para motor Waukesha.....</i>	75

1. Introducción

Dentro de los recursos energéticos que posee actualmente nuestro país, el Gas Licuado de Petróleo (en adelante GLP) es una importante fuente de energía que en la actualidad se viene usando de modo tradicional para cocción, tanto a nivel industrial como residencial, utilizando GLP proveniente de las refinerías de Tibú y Barrancabermeja. El uso de este combustible es una gran alternativa, no solo en Colombia sino en diferentes lugares del mundo, debido a que es posible transportarlo a sitios donde no llegan las líneas de gas natural empleado como recurso para zonas con bajas economías y donde la población posee ingresos relativamente menores.

Sin embargo, uno de los enfoques más actuales para este combustible a nivel mundial, radica en su uso en la generación de energía eléctrica para las facilidades de pozos petroleros; lugar de donde es obtenido como derivado la refinación del crudo de petróleo, ó como residuo del gas asociado de pozo en cada uno de sus yacimientos.

Desde mediados del siglo pasado, se viene generando en los campos petroleros colombianos cantidades considerables de GLP las cuales se están desperdiciando sin beneficios suficientes. La demanda total del país aún no supe la producción lograda y sumado a esto, el mercado de GLP no ha sido lo suficientemente difundido debido al gran auge que presenta el gas natural tanto en el sector industrial como residencial. A pesar de los incrementos de producción logrados en las plantas de procesamiento de crudo y en campos de extracción de petróleo, la oferta continuó en déficit, de forma que en los 90 se creó el conocido “Sistema de Cupos”, el cual consistía en que cada distribuidor de GLP recibía un volumen mensual y una zona determinada y específica para los años de distribución, con el fin de forzar su consumo en cada en cada sitio destinado a su comercialización.

Posteriormente, el gobierno colombiano lanza el Plan de Masificación del GLP y elimina el sistema de cupos, lo que permitió su distribución industrialmente y estableció el uso de éste gas como una cultura, lográndose un aumento del consumo hasta el año 2000. Desde aquella época y debido a temas de regulación que han afectado el precio del combustible, durante la primera década del nuevo siglo se ha disminuido su consumo, por esta razón el gobierno ha tratado de generar nuevos proyectos que permitan extender el consumo de GLP en Colombia.

1.1 Alcance

Partiendo del hecho que los campos petroleros están en expansión en el territorio colombiano y que su demanda de energía está en incremento constante, se ve la necesidad de suplir las facilidades utilizadas en el proceso de extracción y de operación de campos petroleros mediante un recurso de bajo costo y preferiblemente obtenido in situ, que sea aplicable a la tecnología que actualmente utilizan sus facilidades. Entre estas facilidades se cuenta con las que generan energía eléctrica mediante motores de combustión interna alimentados con combustible diésel y gas natural, los cuales son susceptibles de alimentar con GLP de forma que se garantice un funcionamiento aceptable y económico que permita promover masivamente este combustible.

Sin embargo, la aplicación de GLP como combustible puede conllevar algunas variaciones menores en los motogeneradores que funcionan con gas natural, buscando ajustar los consumos de combustible y la eficiencia energética, lo cual se considera como una oportunidad de utilización amplia del GLP que se desperdicia actualmente, mejorando así la canasta energética de combustibles en Colombia.

Con el fin de investigar el GLP como alternativa energética en campos petroleros, la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol S.A.) ha buscado la viabilidad del uso del GLP producido por Cusiana en el departamento del Casanare (sitio en el cual se extrae gas natural con un remanente de gas licuado que no se utiliza actualmente) mediante proyectos de aplicabilidad de este combustible, gestionados por la empresa Energía Eficiente Sostenible e Innovadora (ESEI S.A.). Dentro de estos proyectos se explora actualmente la aplicación de GLP en conjuntos motogeneradores, actividad que enmarca el objeto de ésta investigación.

1.2 Objetivo General

- ✓ Realizar el estudio y la evaluación del comportamiento energético del motor térmico de encendido provocado (MEP) de un motogenerador utilizado en facilidades de campos petroleros, operando con GLP de alto butano.

1.3 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar la prueba de un motogenerador a condiciones locales de Bogotá y bajo reglajes para Gas Natural, operando con GLP de alto butano y bajo protocolo referido a la normatividad internacional.

- ✓ Estudiar la distribución y el comportamiento energético del MEP del motogenerador cuando se utiliza GLP de alto butano.
- ✓ Evaluar la influencia de algunos parámetros operativos ajustables del MEP sobre su comportamiento energético con este combustible, a partir del análisis de los resultados experimentales de las pruebas y del respectivo balance energético.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se realizó una revisión del estado del arte del uso del GLP en Colombia en cuanto a su uso residencial como industrial aplicado a la generación energética, paralelo a esto se estudiaron los principales motogeneradores utilizados en campos petroleros colombianos, basados en combustible diésel y gas natural, y de las pruebas preliminares que se han desarrollado en torno al tema de utilización del GLP para generación de energía, proyectos que en sus inicios han sido liderados por Ecopetrol.

Teniendo en cuenta que los antecedentes de pruebas realizadas se han hecho sin procedimientos documentados, se estableció un protocolo de pruebas basado en normatividad nacional e internacional con el fin de obtener información relevante para realizar un estudio del comportamiento energético del motogenerador seleccionado.

Se realizó el montaje requerido para la obtención de los datos en la medida de las posibilidades logísticas de acuerdo con la envergadura del proyecto y se efectuaron las pruebas, obteniéndose los datos base de estudio utilizando GLP de alto butano en el motogenerador Waukesha con el ajuste para gas natural.

Luego de ello se estableció junto con el propietario del motogenerador una carga estable para realizar el estudio de sensibilidad del motor donde se realiza el ajuste de parámetros que influyen en la eficiencia de generación, monitoreando su calidad de energía, se realizó una variación del avance de encendido y regulación de riqueza de mezcla se obtiene una mejora considerable en la eficiencia de generación.

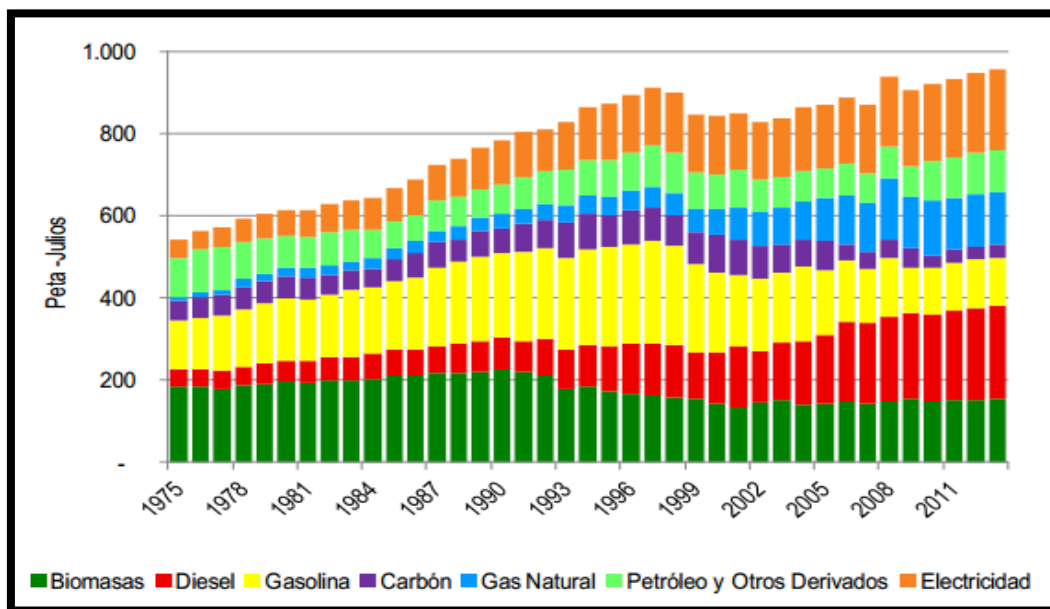
2. Planteamiento del Problema

2.1 Formulación del Problema

¿Es viable utilizar un motogenerador con reglajes de gas natural para operación con combustible GLO de alto butano, subproducto de las corrientes de gas natural tratado en planta de Cusiana? ¿Es factible ajustar ciertos parámetros del motor para que se mejore el desempeño energético del motogenerador operado con GLP de alto butano?

2.2 Descripción del Problema

Es una realidad que Colombia viene presentando un crecimiento continuo de su demanda energética, para el año 2012 se presentó un crecimiento en cuanto a su consumo del 2,2%. Esta demanda energética del mismo año llegó cerca de los 1000 Peta-Julios (1 Peta-Julio equivale a 1018 Julios), según la figura 01 se ha distribuido aproximadamente en un 67% al consumo de fuentes fósiles (carbón, hidrocarburos y sus derivados), 13% son biomásas y un 20% corresponde al consumo de energía eléctrica (es importante aclarar que cerca de 20% de la electricidad procede a su vez de fuentes fósiles y que aproximadamente 7% de la gasolina y diésel consumidos tiene origen vegetal).

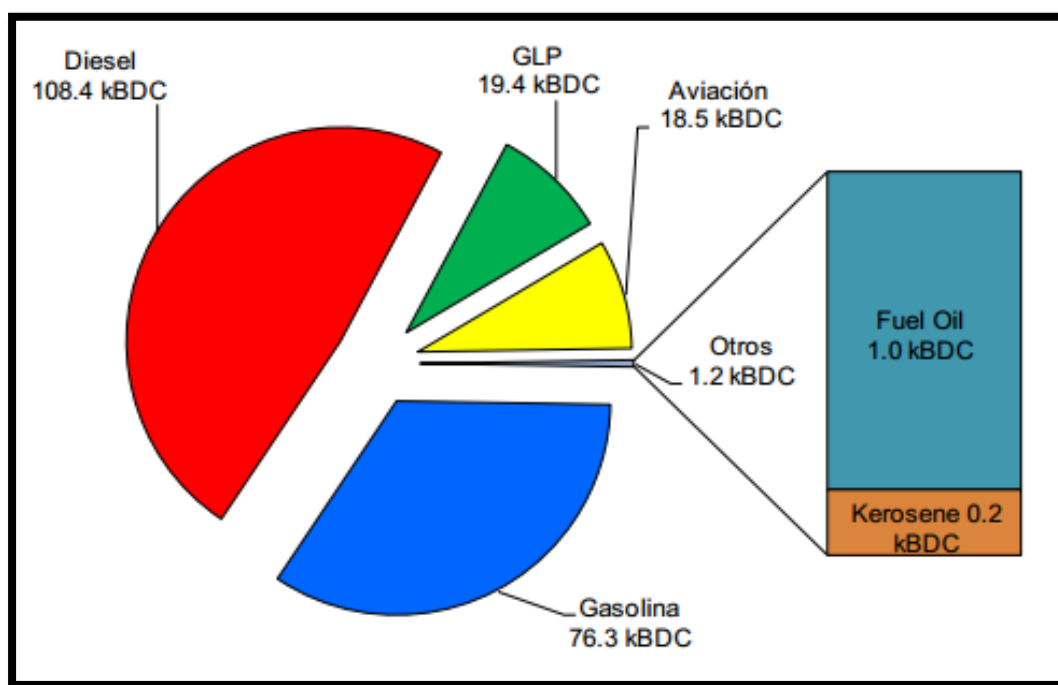


*Figura 1: Demanda final de energía en Colombia – Balances energéticos UPME Años 2011-2012
Fuente: Proyección de demanda energética en Colombia Revisión Marzo de 2013*

Dentro de las nuevas fuentes de abastecimiento energético para suplir las necesidades diarias de energía en el país, se viene explorando el uso de recursos propios de la nación, que contribuyan a minimizar los costos asociados con su obtención. Es de esta forma que han cobrado fuerza derivados del petróleo y del gas, como el GLP.

Como observa en la figura 01, el 67% corresponde a fuentes de origen fósil de las cuales aproximadamente un 3% se consideran como uso de GLP dentro de la canasta energética nacional, razón por la cual si bien se requiere promover su uso, también es importante minimizar los altos consumos de combustible diésel desde los campos petroleros de Colombia.

En cuanto al consumo diario de combustibles derivados del petróleo en Colombia, para el año 2009 el país reporta un consumo de 19,4 kBDC (miles de barriles por día) de GLP, frente al consumo de diésel, combustible utilizado actualmente en la plantas de generación de campos petroleros el cual presenta un consumo diario de 108,4 kBDC. *Figura 02*



*Figura 2: Demanda de derivados de petróleo en Colombia, año 2009.
Fuente: Proyección de demanda de energía en Colombia Revisión Octubre de 2010.*

De las estadísticas de la figura 2 se puede ver que el consumo de GLP es muy inferior al de otros combustibles de origen fósil, razón por la cual se hace necesario plantear nuevas

oportunidades en el consumo de éste combustible, de modo que se puedan utilizar del orden de 20500 barriles diarios producidos en Cusiana y que actualmente se están quemando sin ningún tipo de beneficio.

Es claro, que el consumo de GLP en los últimos 20 años ha sido de apenas el 2,97% como se evidencia en la figura 3, y este se ha distribuido residencialmente y en aplicaciones industriales muy limitadas pese a la gran oferta de GLP que tiene nuestro país; Así también los elevados consumos de combustible diésel abarcan el sector industrial, sector de transporte y campos de extracción de petróleo superando así al consumo de energía Eléctrica del todo el sistema interconectado nacional el cual es generado en un 70% por hidroeléctricas y del cual tiene un porcentaje de participación del 17,50% en el balance energético nacional de los últimos 20 años que no hace parte de la energía eléctrica suministrada en los campos petroleros de Colombia. *Figura 03.*

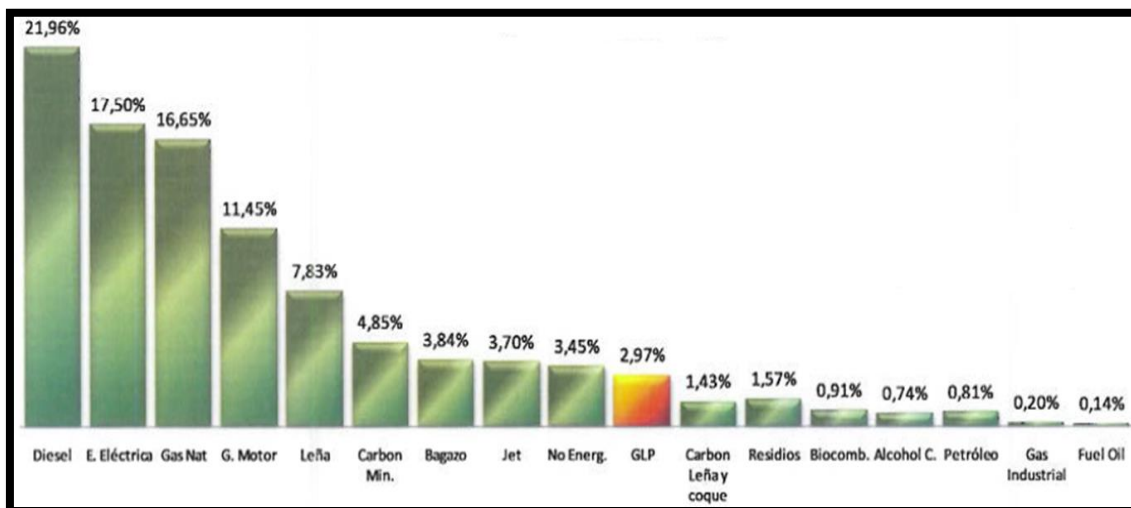


Figura 3: Balance Energético Nacional de Colombia en los últimos 20 años
Fuente: Boletín Estadístico de Minas y Energía, 1990-2010

De las estadísticas presentadas se observa que, del gran volumen de GLP que se tiene a disposición el país, solo un 2,97% se está utilizando sin tener en cuenta las grandes y crecientes demandas de energía en campos petroleros, las cuales se pueden suplir con el uso del GLP disponible en las corrientes de gas asociado de pozo obtenido en campo dicho, lo que seguramente podría reducir los costos asociados con procesamiento y transporte del combustible a los lugares de extracción de crudo. Además de ello, es posible implementarlo sobre los motogeneradores que funcionan actualmente in situ, con gas natural y diésel.

Siendo el GLP un combustible gaseoso de alto contenido energético, es una mezcla constituida principalmente de propano, butano, iso-butano, y en menores concentraciones

propileno o butileno; sin embargo, su concentración varía dependiendo del lugar de exploración y dependiendo del país como lo reporta Masi en la Tabla 02, donde las relaciones volumétricas de propano y butano en el GLP pueden pasar de 25/75 (caso Italia) a 95/5 (caso Suecia), entre otros. En el caso de Cusiana contiene un 47% de butano, incrementando la relación Butano/Propano respecto a los GLP comercialmente utilizados y los cuales han sido ampliamente utilizados y estudiado su comportamiento en motores. El GLP de alto contenido de butano podría ser utilizable en motogeneradores mediante el ajuste de parámetros del motor que permitan obtener calidad de energía óptima; de modo que se refleje su influencia en la eficiencia energética aceptablemente y genere un impacto en los consumos de combustible. De ésta forma sería posible disminuir el consumo colombiano de diésel, el cual en la actualidad es aproximadamente 110 mil barriles diarios mediante el uso masivo de GLP en motogeneradores.

País	Propano-Butano (% Volumen)
Bélgica	50 - 50
Dinamarca	50 - 50
Francia	35 - 65
Grecia	20 - 80
Irlanda	100 - 0
Italia	25 - 75
Países Bajos	50 - 50
España	30 - 70
Suecia	95 - 5
Reino Unido	100 - 0
Alemania	90 - 10

Tabla 1: Relación butano propano de GLP utilizado en el mundo.

Fuente: Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG

3. Estado del Arte y Revisión Bibliográfica

3.1 Generalidades del GLP como combustible

Se entiende por GLP a la sigla que designa a aquellos gases que son obtenidos como subproductos derivados del petróleo y del gas natural, los cuales generalmente se conservan y transportan en fase líquida acompañada en la mayoría de los casos por una cámara gaseosa dentro del recipiente que los contiene.

Básicamente, el petróleo se somete a una operación que fisicoquímicamente se conoce como destilación, mediante la cual se van separando por densidades y puntos de ebullición los diferentes componentes derivados del crudo extraído del yacimiento. Los diferentes productos obtenidos mediante la refinación son:

- Gasolinas ligeras
- Kerosenos
- Butano
- Propano
- Gas-oil
- Fuel-oil
- Aceites pesados

De los anteriores mencionados, el butano y el propano son hidrocarburos que son compuestos formados por carbono e hidrogeno.

Una de las características del carbono es que puede enlazarse a sí mismo. En el propano, los carbonos finales se unen a tres hidrógenos y un carbono central; por esta razón, es que se une en medio de dos hidrógenos. El resultado es $C_3-C_2-C_3$. La manera más simple de escribir esto tiene ángulos de unión de 90 grados de hidrógeno a carbono a hidrógeno. Figura 4.

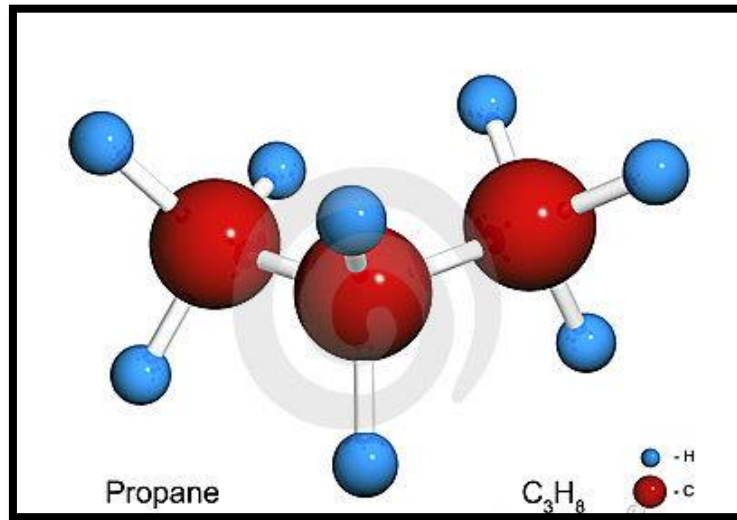


Figura 4: Molécula de gas propano
Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo - Repsol

Para el caso del butano, la cadena es continua y sin ramificaciones en el (n-butano), y se presenta una ramificación para el (i-butano) la cual es lateral. Ambos butanos están presentes en el GLP. Ver Figura 5.

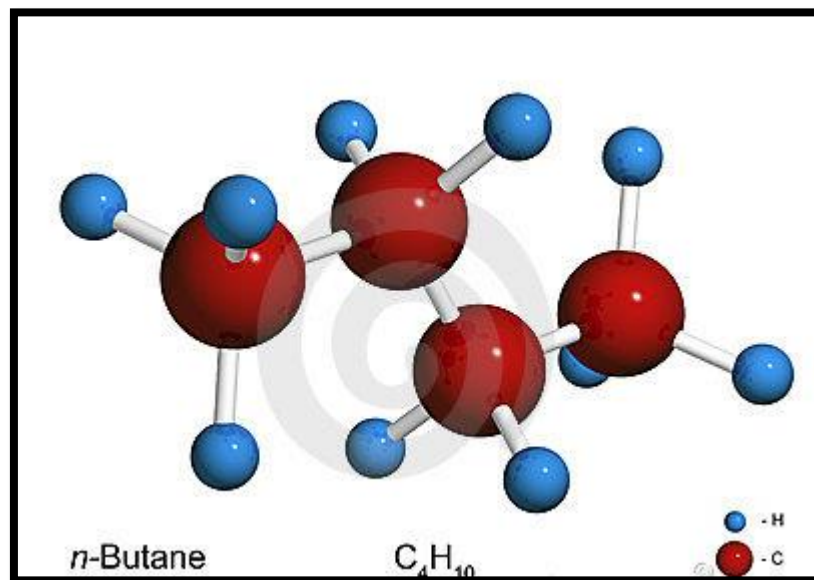


Figura 5: Molécula de gas butano
Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo - Repsol

Para estas moléculas el número de átomos de hidrogeno es el doble más dos, que el número de átomos de carbono. Sin embargo, estas moléculas son en estado puro ya que en la realidad la forma en la que se obtienen los gases son en la forma de mezclas butano y propano en la cual se da el nombre del gas según la molécula que predomina.

De este modo cuando se habla de un butano comercial, se puede encontrar la siguiente composición de gas el cual es conocido como GLP de alto butano, ver Tabla 2:

Componentes Butano Comercial	Densidad Relativa (aire=1)	Densidad Relativa Mezcla media	Poder Calorífico (kcal/Nm ³)	Poder Calorífico de la mezcla (kcal/Nm ³)
Etano	1,049	2,0259	18,67	31,138
Propano	1,562		24,35	
Isobutano	2,064		31,58	
Normal Butano	20,91		32,06	

Tabla 2: Características generales de un Butano comercial

Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo

Y para un propano comercial se puede encontrar la siguiente composición de gas, ver tabla 3:

Componentes	Densidad Relativa (aire=1)	Densidad Relativa Mezcla media	Poder Calorífico (kcal/Nm ³)	Poder Calorífico de la mezcla (kcal/Nm ³)
Etano	1,049	1,6169	18,86	25,189
Propano	1,562		24,35	
Isobutano	2,064		31,58	
Normal Butano	20,91		32,06	

Tabla 3: Características generales de un Propano comercial

Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo

Debido a las variaciones en la composición del GLP en cuanto a propano y butano, no es sencillo dar valores precisos en cuanto a sus densidades (relativa y absoluta). Del mismo modo ocurre con sus poderes caloríficos, de modo que es necesario tener un análisis cromatográfico del gas para poder estimar sus propiedades fisicoquímicas.

La composición del GLP varía dependiendo de donde provenga y puede contener componentes más livianos como etanos y más pesados como los pentanos. Es importante tener en cuenta que la calidad, composición y especificaciones del GLP que se comercializa varía en función de la disponibilidad y condiciones climáticas del sitio donde se realice su aplicación y uso, las cuales pueden ser muy diferentes al sitio donde se realizó el proceso de separación del gas natural y como derivado de procesos de refinación.

El GLP a temperatura y presión normales permanece en fase gaseosa, pero tiene la propiedad de pasar a estado líquido cuando es sometido a presión. Esta propiedad permite facilitar su almacenaje, transporte y distribución; esto permite llevarlo a través de grandes distancias caracterizadas por su difícil acceso de otro tipo de fuentes de energía a bajo costo.

El propano comienza a evaporarse arriba de los -43° C de modo que sus aplicaciones son más comunes en aplicaciones de combustible gaseoso. El butano se evapora arriba de los -5° C, lo que significa que el butano usualmente no se evapora de la misma forma que el propano.

La alta concentración de energía térmica generada en la llama, la uniformidad y precisión para controlar la temperatura y la posibilidad de suministrarlo controladamente en diferentes aplicaciones dan ventajas frente a otro tipo de combustibles tanto líquidos como gaseosos.

Para el caso del uso de GLP en climas cálidos, su composición no es muy crítica en cuanto a su aplicación final, sin embargo, la tendencia es usar un GLP más liviano para aplicaciones industriales debido a que se evapora más rápidamente. Por esta razón la evaporación de los GLP de alto butano al ser más densos es relativamente lenta, de modo que es más compleja su utilización a la hora de una aplicación industrial en la que se requiera de mucha estabilidad como la generación eléctrica con buena calidad energética.

El butano es 12% aproximadamente más denso que el propano, razón por la cual es mayormente viable almacenar y transportar butano licuado que propano. Claro está que se debe tener claridad del análisis cromatográfico el cual define las características fisicoquímicas de la mezcla de gases que conforman el GLP.

Debido a su sensibilidad a las condiciones ambientales, de ser necesario utilizar GLP a temperatura ambiente (condición normal), se requiere un aumento en la presión de uso del gas. Para el caso específico del butano, la presión debe ser aproximadamente superior a 1,3 atm. En el caso del propano, la presión de trabajo debe ser superior a 7,9 atm. De esta forma se entiende que para el almacenamiento de GLP, si se reduce la presión de trabajo, se obtendrá GLP en fase líquida.

Particularmente, para el caso del GLP en un depósito que se encuentra cerrado, la temperatura será directamente proporcional a la presión ya que al aumentar la presión de vapor para la mezcla y el líquido empezará a expandirse.

Un depósito cerrado de GLP no debe calentarse, ya que aumentará su presión interna y podrá generar una explosión. Del mismo modo el recipiente cerrado que lo contiene no debe llenarse completamente de líquido debe dejarse aproximadamente el 20% del volumen total del recipiente para la dilatación propia del combustible licuado ante cambios de temperatura y presión.

3.2 El GLP en el mundo

En la actualidad, aproximadamente el 60% de la población mundial hace uso del GLP, éste proviene del procesamiento de las corrientes de gas natural en un 60% como fracción líquidas y el 40% restante proviene de procesos de refinación de crudo. Esto ha llamado la atención a promover la utilización del GLP como combustible líquido con el fin de utilizar estos residuos de gas provenientes de estos procesos, ya que él tiene una gran acogida frente al uso de gas natural seco.

El GLP, tiene ventajas frente a su manipulación, ya que es un combustible de fácil acceso, transporte y almacenamiento en comparación al gas natural y otros combustibles. A nivel mundial, desde al año 2000 su consumo ha venido presentando un crecimiento a la par del gas natural quien ha aumentado considerablemente su utilización. En 2011 la producción de GLP fue del orden de 8,6 millones de barriles por día aumentando esta producción a 8.8 millones de barriles por día en el año de 2012.

Existen factores que involucrados en la producción de GLP a nivel mundial, producción y precios del petróleo, la gran demanda de gas natural y el consumo de GLP en diversos sectores.

Para la década del 2000, la demanda de GLP creció principalmente debido al aumento de su producción y oferta, demostrando que lo que generalmente ha impulsado su consumo y su continua producción como residuo de otros procesos ya mencionados. Asia y el medio oriente han tenido los mayores consumos, seguido por América latina.

Dentro de los mayores usos que se ha dado al GLP en el mundo, se encuentra el sector residencial, industrial, agroindustrial, transporte, eléctrico y con una fuerte relevancia en el sector petroquímico y la industria manufacturera con los mayores consumos. Sin embargo,

el sector del transporte en el cual el combustible gaseoso es utilizado como fuente de energía automotor se ha posicionado fuertemente en países del mundo. Siendo mucho más rentable su uso frente a la gasolina y el diésel, aunque en algunos casos se ha utilizado de manera dual combinado con el diésel para aplicaciones de transporte pesado.

Hablando de estas aplicaciones en motores de combustión interna, para el año 2010, se obtuvo un consumo de 0,68 millones de barriles diarios y su tendencia ha sido creciente con más de 17 millones de vehículos utilizando GLP como combustible gaseoso. La utilización de éste combustible abarca el 9% de la demanda mundial de gas licuado variando considerablemente de país a país, siendo promovida su utilización por políticas ambientales que buscan reducir la contaminación del aire y el exceso de concentración de gases de efecto de invernadero y de material particulado.

Otro de los usos importantes del GLP a nivel mundial y tema del cual hace parte esta investigación es el uso en generación de energía eléctrica, tema en el cual se viene investigando y haciendo adaptaciones tecnológicas a nivel latinoamericano donde se encuentran países productores de crudo buscando ajustar precios de energía generada.

3.3 El GLP en Colombia

En Colombia, la oferta de GLP se basa en la producción que se obtiene de las plantas de refinación de crudo, sin embargo se dan aún casos de importación de GLP debido a temas operativos de las refinerías. Actualmente, los productores de GLP a nivel nacional están dados por Ecopetrol desde ya hace más de 70 años y por Rancho Hermoso en el departamento del Casanare desde el año 2005. Adicional a estos centros de productivos de GLP, desde el año de 2010 arranca campo Dina y campo Cusiana.

En la actualidad, aproximadamente el 6% del consumo de GLP en Colombia proviene de empresas diferentes a Ecopetrol dentro de las cuales encontramos:

- CANACOL ENRGY COLOMBIA S.A.
- INTEROIL COLOMBIA E&P
- VETRA E&E COLOMBIA S.A.
- PERENCO COLOMBIA LIMITED
- PETROMINERALES COLOMBIA LTDA.
- TERMOYOPAL

Sin embargo, estas lo están comercializando para usos de carácter residencial. De éste modo se puede ver como en nuestro país está tomando fuerza su producción y comercialización dentro del mercado nacional.

El campo de Cusiana (Ecopetrol), actualmente está produciendo 4000 barriles por día en los últimos dos años superando a la refinería de Cartagena con 3112, sin embargo y viendo que su producción continúa en crecimiento se debe hallar mayores campos de utilización de GLP. Ver Tabla 4.

Año	Ecopetrol					Canacol	Interoil	Vetra	Perenco	Petrominerales	Termoyopal	Otros	Total
	Barranca	Cartagena	Apiay	Cusiana I	Dina	R. Hermoso	Toqui T.	La Punta	La Gloria	Corcel	Pauto-Flor.	Productores	Producción
	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	%	BPD
2002	19.906	3.552	1.201									0%	24.660
2003	19.271	2.587	1.071									0%	22.929
2004	18.293	2.589	983									0%	21.864
2005	18.329	2.586	969			39						0%	21.923
2006	18.718	2.750	893			184	12					1%	22.558
2007	18.623	2.898	628			207	14	4				1%	22.374
2008	17.043	3.209	667			91	11	36				1%	21.056
2009	15.363	2.697	724			110	4	116	17			1%	19.030
2010	14.154	2.734	760		190	253	4	62	21	81		2%	18.261
2011	13.031	3.437	755	264	305	161	23	168	42	279		4%	18.464
2012	11.438	2.166	723	4.008	340	100	39	8	42	245		2%	19.110
2013	9.983	3.112	705	4.420	264	75	38	18	16	83	881	6%	19.597

*Tabla 4: Producción Colombiana de GLP por fuente de suministro en barriles por día
Fuente: SUI y Termoyopal*

3.4 Caracterización de GLP de Cusiana

La planta de gas licuado de petróleo de Cusiana conocida como el complejo de hidrocarburos más importante de Colombia está ubicado en el departamento del Casanare y es perteneciente a Ecopetrol, trabaja desde el primero de diciembre de 2012 con el fin de

aumentar la producción del combustible GLP en el país de modo que se pudiera eliminar las importaciones del gas. Figura 6.



*Figura 6: Planta de operación Cusiana
Fuente: Diario en Tiempo Agosto 8 de 2011*

En éste campo la planta de hidrocarburos tiene una producción diaria de gas natural es de 270000 pies³ diarios, además trabaja como llenadero y producción de gas y está diseñada para producir 6800 barriles diarios de GLP con alto contenido de propano, separándolo del gas natural que se produce en el yacimiento.

Este GLP abastece aproximadamente el 30% de la demanda domiciliaria nacional actual en los mercados del centro y oriente del país.

La planta está conformada por tres secciones:

- Zona de estabilización de condensados
- Zona de almacenamiento
- Zona de llenadero

La zona de almacenamiento consta de nueve balsas, cada una de ellas con una capacidad de 2000 barriles de GLP.

La utilización del GLP obtenido de las corrientes de gas natural en esta planta podría suplir las necesidades de las zonas no interconectadas del país mediante una fuente de energía portátil, movable, la cual no requiere una infraestructura de tubería para su transporte y

que puede ser excelente para la generación de energía eléctrica, la industria y el transporte sustituyendo el combustible diesel mejorando los requerimientos energéticos de zonas apartadas del país y la eficiencia energética del campo petrolero.

La composición del GLP y sus características fisicoquímicas afectan directamente la calidad del gas frente a su disposición y aplicación final. Estos dependen directamente de sitio de producción y del proceso de obtención.

En la refinería de Barrancabermeja, el GLP dispone de un mayor contenido de butanos en un promedio del 79%, mientras que el producido en la refinería de Cartagena cuenta con un contenido de butanos del 49%.

Para los campos de Apiay y Cusiana, el contenido de butanos oscila entre el 40 y el 50%, estos GLP son obtenidos de las corrientes de gas natural producido en sitio. En la Figura 7, se puede ver el contenido promedio de butanos reportado del GLP según el sitio de producción.

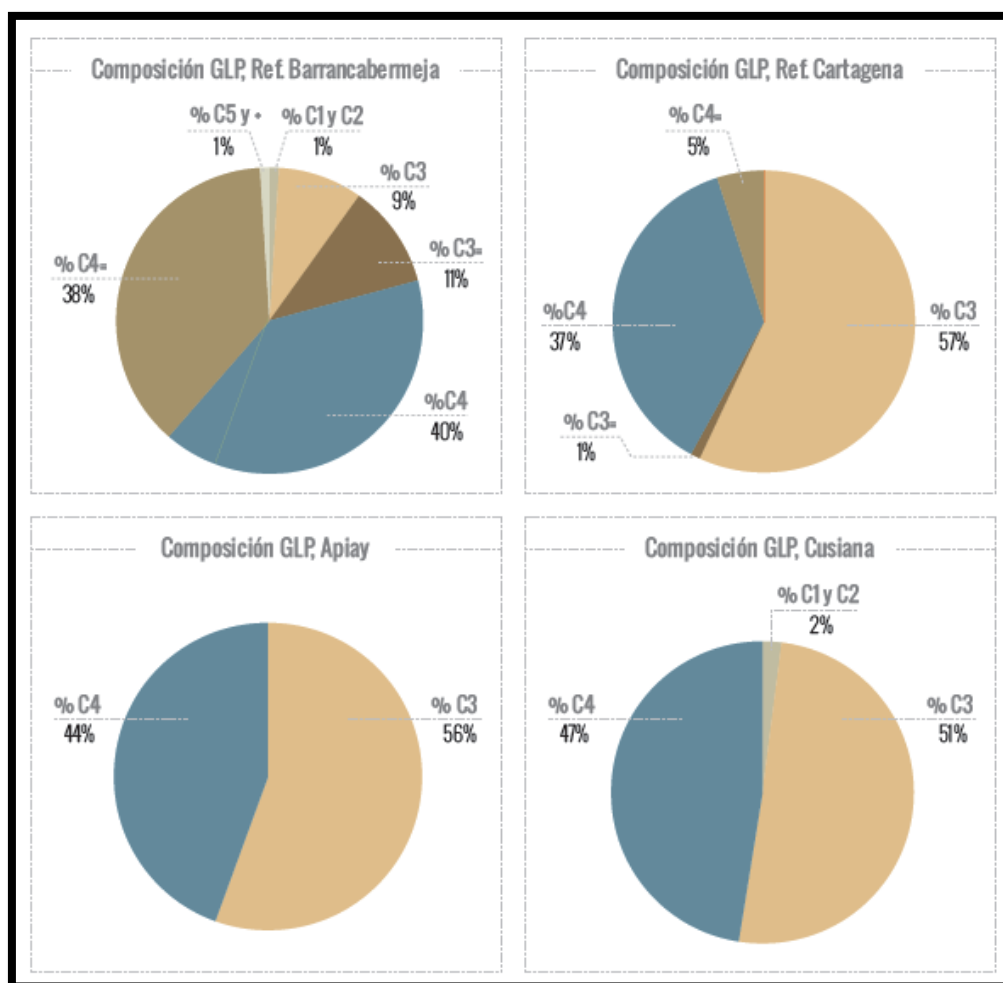


Figura 7: Composición de GLP por fuente de suministro
Fuente: Las Cadenas de los Gases Licuados de Petróleo Colombia

Cusiana posee un alto grado de contenido de butanos lo que genera dificultad en el uso del GLP para procesos que requieren una gran estabilidad como lo es el caso de la generación de energía eléctrica. Un 47% de contenido de butanos presenta un alto contenido energético pero con la característica de que posee una mayor densidad, lo que conlleva a realizar algunos ajustes a la hora de realizar la utilización de combustible en un proceso definido.

3.4.1 Vaporización natural de GLP de Cusiana

La vaporización natural del gas licuado de petróleo de Cusiana se describe en la figura 8 discriminando el vapor de alta presión del líquido de alta presión.

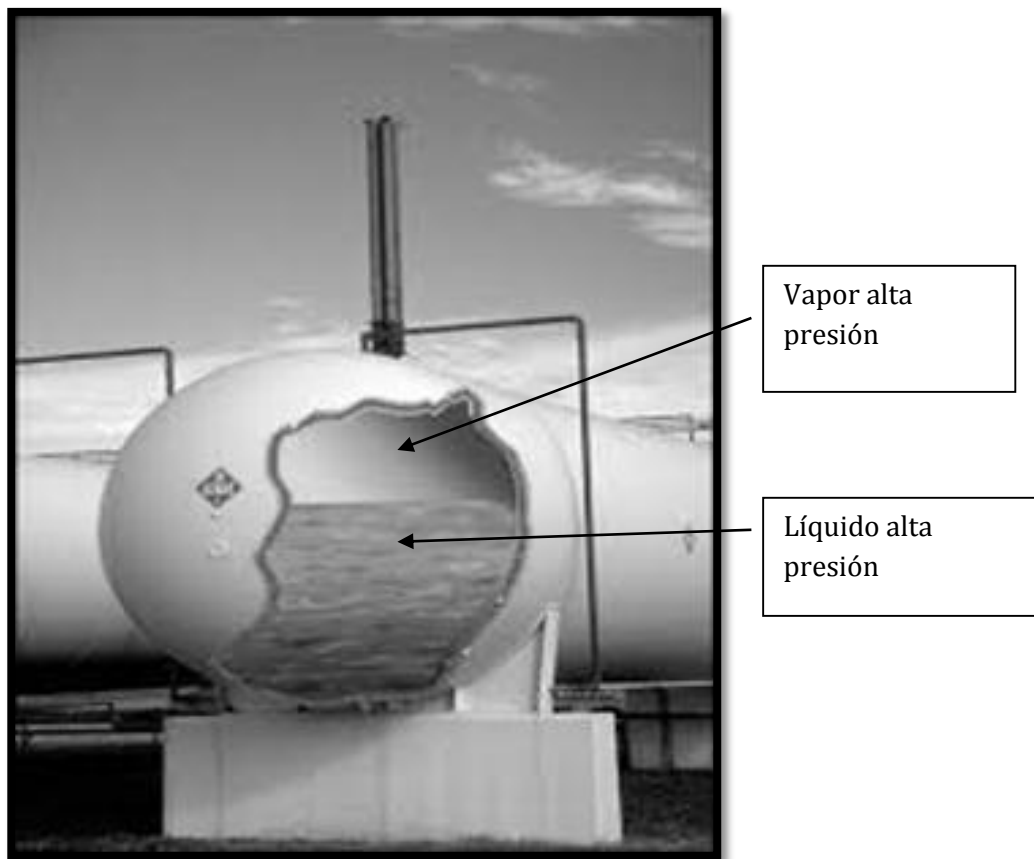
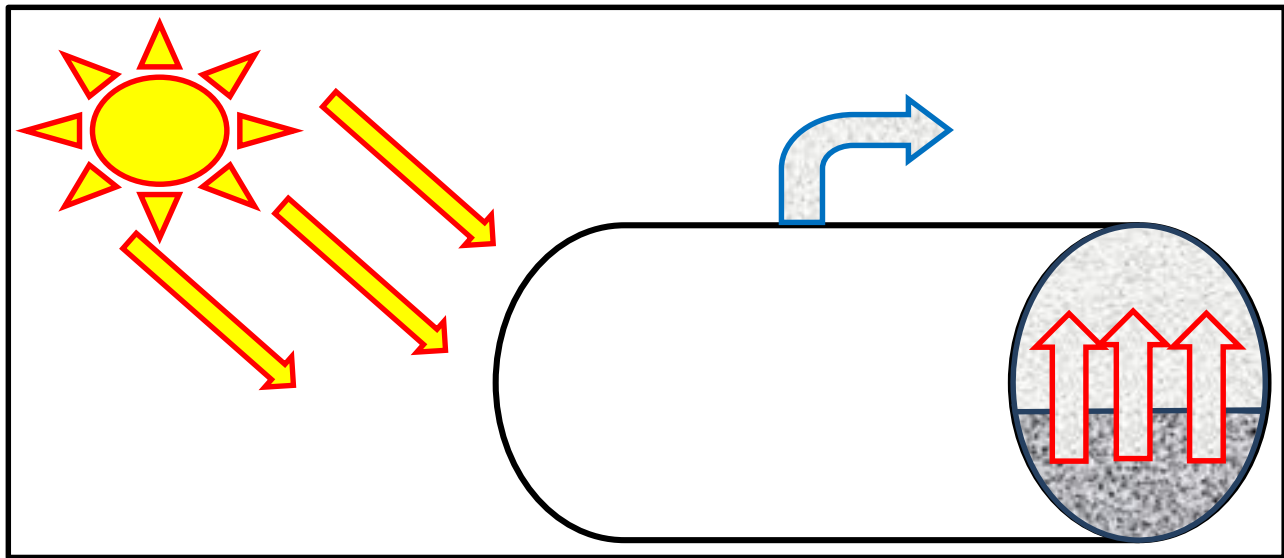


Figura 8: Cisterna de almacenamiento de GLP con volumen de líquido y espacio para gas
Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo

Luego de su producción y procesamiento, el GLP es almacenado en balsas o tanques de almacenamiento en estado líquido, sin embargo hay que tener en cuenta que no se puede ocupar completamente el 100 % de su volumen ya que siempre permanecen juntas las fases, tanto líquida como gaseosa.

Tomando como base la Figura 9, la temperatura ambiente define la transferencia de calor a la cisterna de almacenamiento (donde se descuenta del área de transferencia la porción de material de la cisterna en contacto con el GLP gaseoso ya que el intercambio de energía es muy pequeño) y en la medida que se consume el GLO gaseoso de la cisterna se reduce la presión a la que está sometido el GLO líquido, al bajar la presión de la cisterna, el GLP líquido absorbe el calor del ambiente para vaporizarse. Por esta razón a mayor temperatura ambiente la tasa de cambio de fase líquido a gas será mayor, contribuyendo así con la vaporización natural; al contacto con la mano desde la parte externa de la cisterna se puede conocer el nivel líquido ya que su temperatura es mucho menor al tacto, esta parte es conocida como la zona mojada de la cisterna de almacenamiento.



*Figura 9: Evaporación natural de GLP
Fuente: Los Gases Licuados de Petróleo*

En resumen, a mayor tamaño de la cisterna, se presentará mayor área de zona húmeda por lo tanto mayor será la capacidad de vaporización, si la temperatura ambiente del aire es mayor también será mayor la vaporización del GLP y cuando la tasa de vaporización es mucho mayor que la de consumo, la presión del tanque aumenta.

3.4.2 Resultados de Cromatografía

En cuanto al GLP de Cusiana, el butano en relación al propano, tiene un punto de vaporización más cercano a los 0 °C, por esta razón al hacer uso de un GLP con alto contenido de butano tendrá una menor capacidad de vaporización respecto a un GLP con mayor contenido de propano. Esto genera dificultad en su uso especialmente en las regiones frías del país donde se requiere una vaporización rápida del combustible.

Generalmente los valores promedio de composiciones químicas del GLP se dan mediante datos cromatográficos del combustible en fase líquida. De aquí el concepto de las proporciones entre butano y propano identificando así cuando el GLP es de alto butano.

Los datos plasmados en la Tabla 5 fueron tomados directamente de cisterna de GLP en el momento de realizar las pruebas de generación eléctrica mediante motor de combustión interna a gas.

Descripción de la muestra		Líquido GLP	
	Condiciones de muestreo	50.0 psig @ 65.8°F	
	Componente	% Mol	% Peso
CO2	Dióxido de carbono	0,01	0,01
N	Nitrógeno	0,01	0,00
C1	Metano	0,00	0,00
C2	Etano	0,39	0,23
C3	Propano	49,84	43,05
iC4	i-Butano	22,71	25,86
nC4	n-Butano	26,92	30,68
iC5	i-Butano	0,11	0,16
nC5	n-Pentano	0,00	0,01
C6	Hexano	0,00	0,00
C7	Heptano	0,00	0,00
C8	Octano	0,00	0,00
C9	Nonano	0,00	0,00
C10	Decano	0,00	0,00
C11	Undecano	0,00	0,00
C12+	Dodecano plus	0,00	0,00
	Total	100,00	100,00
	Nota: 0.00 significa menos que 0.005		
	Propiedades de residuos calculados	Mol Peso ($g\ mol^{-1}$)	Density ($g\ cm^{-3}\ a\ 60^{\circ}f$)

*Tabla 5: Cromatografía de GLP en estado líquido de Campo Cusiana utilizado en las pruebas de motogenerador
Fuente: ESEI S.A.*

Partiendo de estos datos se puede determinar que el contenido de butanos en fracción molar (C_4) 49.63% y el de propano es de 49,84%, lo que categoriza a este GLP como de (GLP de alto butano); éstos datos se encuentran dentro de los promedios tomados para gas licuado de yacimiento de Cusiana.

Generalmente las cromatografías que se realizan para caracterizar el combustible GLP en sitio se toman directamente de la válvula de salida de la cisterna en fase líquida. El GLP generalmente, se almacena transporta y vende a presión y en estado líquido. La Figura 9

muestra el comportamiento de la presión del GLP tanto en estado líquido como en vaporización natural dentro del tanque de almacenamiento.

Para el caso del GLP de Cusiana, se realizó simultáneamente una toma de muestra de GLP gaseoso de la misma cisterna para comparar la cromatografía, ya que esta es la muestra del GLP útil que entraría al motogenerador durante la prueba.

Los resultados de ésta cromatografía se muestran en la Tabla 6:

	Componente	% Mol	% Peso
CO ₂	Dióxido de carbono	0,00	0,00
N	Nitrógeno	0,01	0,01
C ₁	Metano	0,00	0,00
C ₂	Etano	1,00	0,62
C ₃	Propano	65,39	59,23
iC ₄	i-Butano	17,44	20,82
nC ₄	n-Butano	16,12	19,26
iC ₅	i-Butano	0,04	0,06
nC ₅	n-Pentano	0,00	0,00
C ₆	Hexano	0,00	0,00
C ₇	Heptano	0,00	0,00
C ₈	Octano	0,00	0,00
C ₉	Nonano	0,00	0,00
C ₁₀	Decano	0,00	0,00
C ₁₁	Undecano	0,00	0,00
C ₁₂₊	Dodecano plus	0,00	0,00
	Total	100,00	100,00

Tabla 6: Cromatografía de GLP en estado gaseoso de Campo Cusiana utilizado en las pruebas de motogenerador.

Fuente: ESEI S.A.

De estos resultados se puede analizar que una vez se vaporiza el GLP, la concentración de propano – butano cambia considerablemente de modo que al entrar en proceso de ebullición los componentes livianos del gas tienden a subir, mientras que los componentes pesados tienden a bajar por proceso de decantación. Este fenómeno que se descubre al realizar estos ensayos cromatográficos demuestra que la densidad del combustible presente en la cisterna varía en relación al nivel de GLP líquido almacenado y aunque el GLP es fácilmente vaporizable, es difícil controlar su vaporación natural.

El uso de vaporización natural y el análisis cromatográfico en fase gaseosa para la presente prueba permite ver que aunque el GLP es de alto butano en fase líquida, al entrar en ebullición las proporciones de combustible cambian haciendo que el GLP sea apto para su utilización.

3.5 Características físico-químicas del GLP de Cusiana utilizado en las pruebas

A partir de los datos reportados en el análisis de cromatografía se permite establecer algunas propiedades físico-químicas de la mezcla. Parámetros tales como peso molar, densidad como gas ideal, factor de compresibilidad, y poder calorífico superior e inferior serán de gran utilidad durante los análisis posteriores. El poder calorífico se reporta en BTU-ft⁻³; sin embargo, se emplea para efectos de cálculos se emplea un factor de conversión igual a 37,25895 kJ-m⁻³ por BTU-ft⁻³ con el ánimo de manejar las variables en el sistema internacional de unidades (SI).

Propiedad	Unidades	Inicial	Final	Condiciones
Peso Molecular	$g\ mol^{-1}$	47,19	48,68	
Densidad gas ideal	$kg\ Nm^{-3}$	1,986	2,048	A 14,65psia, 15,6°C
Factor de compresibilidad		0,979	0,978	
Poder calorífico superior	$kJ\ Nm^{-3}$	101578	104761	A 14,65psia, 15,6°C
Poder calorífico inferior	$kJ\ Nm^{-3}$	93529	96497	A 14,65psia, 15,6°C

Tabla 7 Propiedades físicoquímicas consideradas para el GLP con base en resultados de la cromatografía.

Las condiciones estándar para el gas natural y otros combustibles gaseosos equivalen a una presión de 14,696 psia (101,325 kPa, 1 atm) y temperatura de 288,15 K (59°F, 15°C) según la norma ISO15970:2008(6). Por ende, toda medición de volumen reportada a estas condiciones se considera en metro cubico normal de gas [Nm^3]. La energía entregada por el combustible en función de la masa se puede calcular mediante la división del poder calorífico y la densidad real a las condiciones estándar. Densidad que a su vez se establece con el factor de compresibilidad, según las ecuaciones que se presentan a continuación.

$$VP = ZnRT$$

$$\frac{P * PM}{Z * R * T} = \frac{m}{V} = \rho$$

Donde, $V [Nm^3]$ es el volumen de la mezcla gaseosa, $P [Pa]$ equivale a la presión absoluta, Z al factor de compresibilidad, $n [mol]$ las moles del compuesto, R a la constante universal de gases [$8,3145 m^3 Pa mol^{-1} K^{-1}$], $T [K]$ a la temperatura, $PM [g mol^{-1}]$ al peso molecular del gas y $\rho [g m^{-3}]$ es la densidad real a condiciones estándar.

Propiedad	Unidades	Inicial	Final
Densidad mezcla real	$Kg Nm^{-3}$	2,039	2,105
Poder calorífico superior (HHV)	$MJ kg^{-1}$	49,828	49,765
Poder calorífico inferior (LHV)	$MJ kg^{-1}$	45,879	45,839

Tabla 8 Poder calorífico superior e inferior calculado con base en densidad real a condiciones estándar.

El efecto del aumento del n-butano e iso-butano en el GLP que sale después de ir desocupando la cisterna hace que el poder calorífico caiga levemente debido a la mayor cantidad de hidrógenos presentes en las cadenas C_4 ; sin embargo, estos son valores que están en el rango típico para el GLP empleado en algunas partes del mundo para el uso energético en motores de combustión interna.

3.6 Introducción a los motogeneradores

Los motogeneradores son accionados por motores son conocidas por muchos nombres, las primeras máquinas eran llamadas plantas de luz, una terminología totalmente descriptiva y su finalidad era proporcionar energía para lámparas eléctricas. Las modernas plantas generadoras de electricidad accionadas por motores suministran energía eléctrica tanto para obtención de luz como para otros usos domésticos e industriales. Son llamados corrientemente grupos electrógenos, generadores, plantas de energía, plantas electrógenas, centrales eléctricas, grupos marinos, grupos móviles o simplemente grupos.

El primer auge en la producción de luz vino cuando la América rural descartó las velas y las lámparas de queroseno en favor de las luces eléctricas. Los generadores producían corriente continua (c.c.) que cargaba un banco de baterías usualmente a 32 voltios. Las centrales de luz posiblemente vinieron a suplementar a un sistema generador cargador de baterías accionados por la energía del viento. Cuando aumentó la demanda de energía eléctrica, el elevado coste de las grandes baterías que se hacían necesarios, fue un factor que aceleró la adopción de las plantas eléctricas de corriente continua a 115V sin baterías. Los sistemas de corriente continua tenían tan serias limitaciones, la creciente popularidad

de los receptores de radio que funcionaban con corriente alterna (c.a.) y la posibilidad de disponer de motores y aparatos de corriente alterna menos caros que los de continua, aceleraros e desarrollo de los pequeños grupos electrógenos introducidos en 1928.

Debido a que las lineras de transporte de energía se extendieron por todas partes a partir de los centros de población más importantes, la necesidad de plantas eléctricas individuales disminuyó, la segunda guerra mundos creo una demanda de miles de grupos electrógenos de todas las potencias. Los fabricantes aumentaron su capacidad de producción y las fábricas trabajaron a pleno ritmo. Dada la impresión de que una vez terminada la guerra habría un excedente de grupos electrógenos suficiente para cubrir las necesidades del mercado durante años. Esta impresión resulto falsa, pues cuando la guerra término continuó la demanda de equipo nuevo, el déficit de equipos de distribución eléctrica en la posguerra, unido al auge de la construcción, crearon enormes mercados para los motogeneradores portátiles. Los constructores crearon usaban los motogeneradores en lugares donde no se disponía de un de energía suministrada por las compañías.

3.6.1 Combustibles para motogeneradores

Diversos factores influyen en la elección del combustible que debe usarse para alimentar el motor como son la disponibilidad, coste del combustible, precio inicial de equipo, costes de mantenimiento a largo plazo, los reglamentos locales contra incendios, el uso a que se destina y las preferencias personales. Los motores para motogeneradores pueden funcionar con gasolina, gas natural, gases manufacturados, gases licuados de petróleo (GLP) y gas-oil. Hay también sistemas capaces de funcionar lo mismo con gasolina que con gas, se denominan sistemas de carburación combinada.

La caloría es la unidad que se emplea para medir la potencia calórica de un combustible. Una caloría representa la cantidad de calor requerida para elevar un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua. La Tabla 9 muestra las potencias caloríficas de los combustibles más comunes.

Combustible	Capacidad calorífica normal den kcal
Gas manufacturado (de carbón)	4.000 a 7.100 kcal/m ³
Gas natural	7.600 a 9.800 kcal/m ³
Gas licuado de petróleo (GLP)	22.300 kcal/m ³

Gasolina	7.600 kcal/m ³
Gas-oíl	9.300 kcal/m ³

Tabla 9: potencias caloríficas de los combustibles más comunes.

Los combustibles de uso más general son la gasolina y el gas-oíl. Si un automóvil o un camino pueden llegar al emplazamiento del grupo electrógeno, es muy probable que halle cerca haya una estación de gasolina. La misma estación puede normalmente prestar servicios mecánicos de reparación cuando se precise.

El gas-oíl ha disfrutado tradicionalmente de un trato más favorable por parte de los gobiernos en lo que respecta a impuestos, dándole esto una ligera ventaja, en cuanto al coste. Las ventajas son aún mayores en aquellos estados que permiten precios más bajos cuando el gas-oíl se destina a usos industriales o ajenos al transporte.

➤ Gasolina

Muchas gasolinas contienen aditivos (compuestos de plomo tetraetilo) que se acumulan en las cámaras de combustión. Estos depósitos indeseables son expulsados de un motor ordinario de automóvil cuando el motor funciona a diversas velocidades. Al funcionar los motores de grupos electrógenos a una velocidad constante los depósitos de plomo irán en aumento. La gasolina usada como combustible para grupos electrógenos debe ser un número de octano <<normal>>, si se usan combustibles <<súper>> <<extra>>, el motor requerirá revisiones frecuentes, lo cual lleva a un mayor coste de mantenimiento.

Cuando se usa gasolina como combustible, una pequeña parte se escurre por las paredes del cilindro y diluye los aceites de lubricación en el Carter. Otro defecto de la gasolina como combustible es el hecho de que no se conserva bien en largos periodos de tiempo.

No es recomendable almacenar gasolina durante más de un años pues ese forma unos barnices que pueden atascar la bomba del combustible y el carburador.

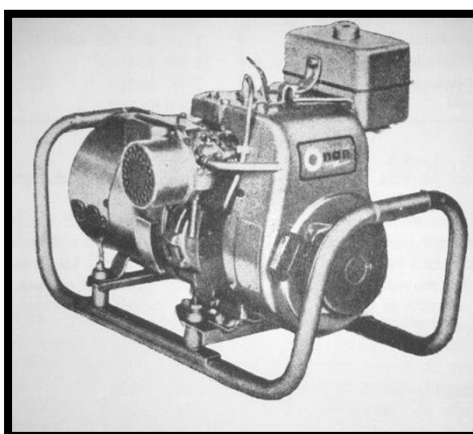


Figura 10: Motogenerador portátil.

Fuente: Libro Grupos Electrogenos, Loren J. Mages

La gasolina es un combustible adecuado para usar en motogenerador ligeros y portátiles. Otra ventaja es que los motores de gasolina arrancan mejor a temperaturas ambiente comprendidas dentro de un amplio margen.

Es posible que los códigos locales de construcción y antiincendios restrinjan muy seriamente la cantidad de gasolina que puede almacenarse en un local, la cantidad de gasolina en un edificio debe estar, por supuesto, limitada al mínimo absoluto. Los depósitos enterrados deben guardar una distancia prefijada de los edificios existentes y las líneas limítrofes. De todos modos si va almacenar gasolina, asegúrese de que cumple los reglamentos locales de edificación.

Combustibles gaseosos

Salvo pequeñas modificaciones de los sistemas de carburación los motores que usan gas natural, gas manufacturado, o GLP en estado gaseoso, como combustible, son similares a los motores de gasolina, al no tener combustibles gaseosos, de acuerdo con la capacidad de lubricación, deben diseñárselos motores para combustibles secos, algunas ventajas de los combustibles gaseosos son:

1. Mínimo almacenamiento de carbonilla, menos puntos calientes
2. No se deposita plomo, menor quemado de las válvulas
3. Aceite más limpio, menos sedimentos y menor consumo de aceite
4. No se escurre combustible por las paredes de los cilindros, no se diluye el aceite del cárter
5. Una mayor vida del motor
6. Se mantiene <fresco> almacenado, no presenta pues características de formación de gomas.
7. Alto octanaje, lo que hace posible una más alta compresión sin que haya detonación.

➤ **Gas Natural**

Si se desea obtener la misma potencia eléctrica de un motogenerador con un motor que usa combustible gaseoso, que la que podría obtenerse con gasolina, será necesario usar combustibles con una potencia calorífica de 9800 kcal/m³ o más. La potencia del grupo disminuirá de un 15 a un 20% para los combustibles de 7500 kcal/m³ y del 40 al 50% para

gases de 4000 kcal/m³. Aumentando la relación de compresión del motor, usando las culatas o pistones de alta compresión, se aumentara la potencia del motor, el uso del gas natural como combustible presenta otra ventaja, no es necesario situar el emplazamiento del grifo depósitos de combustible.

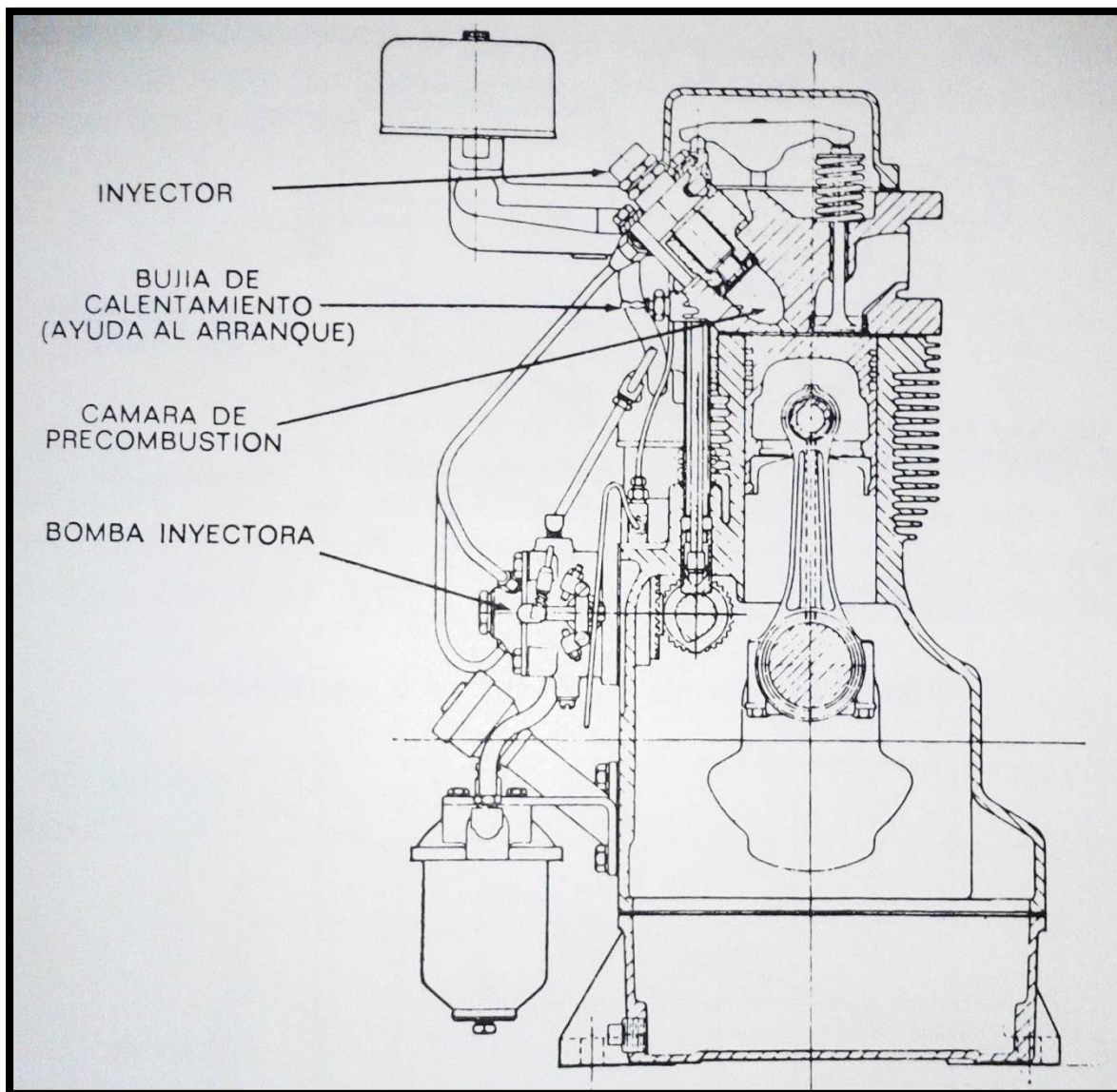
➤ **Gases licuados de petróleo**

Los gases de petróleo consisten en una mezcla de propano y butano. Estos gases se almacenan bajo presiones de 5 kcal/m² o más. Los gases de petróleo se suministran en estado líquido y en recipientes de acero. Cuando el líquido es liberado de la presión a que estaba sometido se convierte en gas a temperaturas normales. Cuando se alimentan grandes motores con gases de petróleo como combustible. P cuando las temperaturas ambiente son bajas, se requiere un intercambiador de calor (gasificado) suplementario. Los gases de petróleo son generalmente más caros que el gas natural. Los gases licuados de petróleo en estado gaseoso son más pesado que el aire y por esta razón si se escavan, llenaran los pozos, sótanos y otros lugares, creando el peligro de que se produzca una tremenda explosión. El almacenamiento y manejo de gases de petróleo debe hacerse siguiendo rigurosamente los reglamentos locales o estatales. Los depósitos de almacenamiento deben estar en el exterior, por encima del suelo, y a una distancia especificada de los otros edificios. Las tuberías deben ser también las reglamentarias.

➤ **Gas-Oíl**

El gas-oíl tiene una alta potencia calorífica y es generalmente el combustible menos caro. Los motores diésel son motores de combustión interna que usan el calor de la compresión del aire para encender el combustible. Las presiones internas requeridas para generar el calor necesario son muy altas comparadas con los motores de gasolina. Por esta razón las piezas de los motores diésel son más pesadas, robustas, y mayor el precio de estos motores. Los motores diésel requieren un servicio menos frecuente y en general duran mucho más que los motores de gasolina. El arranque de un motor diésel a bajas temperaturas puede precisar de ayudas especiales.

El gas-oíl no es explosivo. Por tanto su almacenaje ofrece un mínimo de problemas. En la mayoría de los casos, el combustible puede almacenarse tanto dentro como fuera de la estructura así como encima o debajo del suelo.



*Figura 11: Vista seleccionada de un motor Diésel de 4 tiempos refrigerado por agua.
Fuente: Libro Grupos Electrogenos, Loren J. Mages*

Puede presentarse una objeción contra el uso de combustibles suministrados por tubería, como el gas natural o el gas manufacturado; existe la posibilidad de que puede cortarse al mismo tiempo el suministro de gas y electricidad (a causa de una explosión, terremoto, sabotaje, etc.).

El almacenamiento de combustible en emplazamiento del grupo resuelve esta situación. Una solución alternativa sería tener un motogenerador con motor de carburación

combinada, por ejemplo que normalmente usa gas natural pero puede usar también gasolina o gases de petróleo.

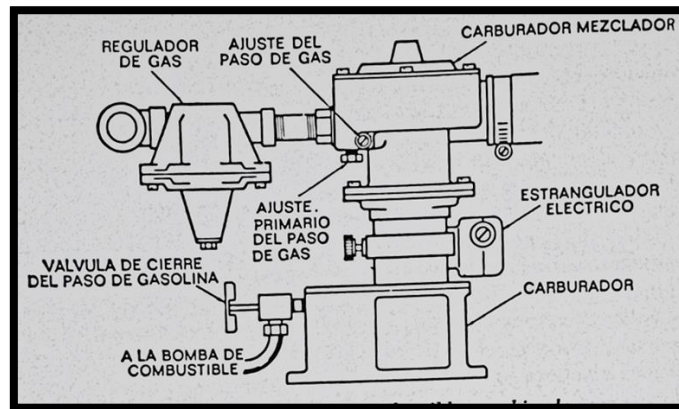


Figura 12: Sistema de combustible combinado

Fuente: Libro Grupos Electrogenos, Loren J. Mages

El combustible de reserva almacena en cantidad menor de la que sería necesaria si fuera el único combustible.

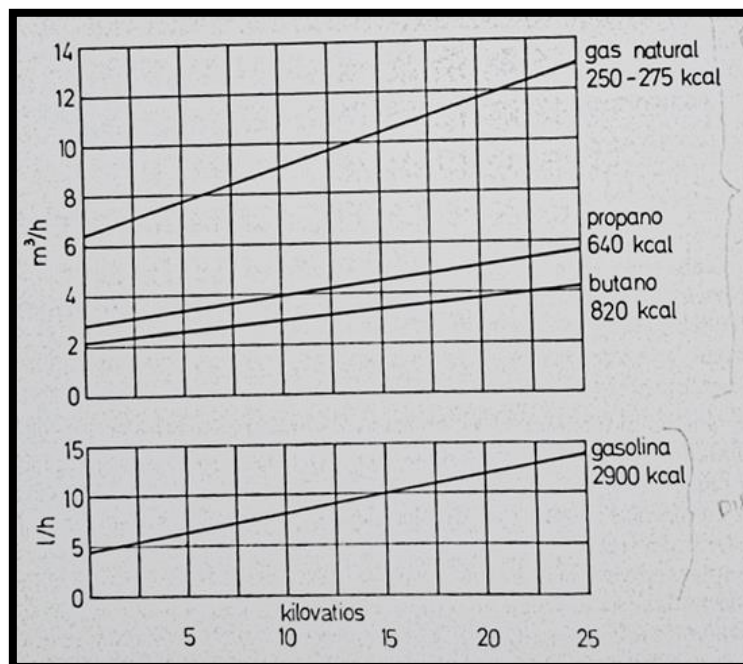


Figura 13: Curvas de consumo medio de combustible de un grupo de 25 kW 1800 r.p.m. corriente alterna

Fuente: Libro Grupos Electrogenos, Loren J. Mages

En la *Figura 13* pueden verse las curvas promedio del consumo de combustible para un motor de un campo electrógeno de 25 kW.

3.7 Generación de Energía Eléctrica en Campos Petroleros

Los campos petroleros de Colombia están ubicados en sitios geográficos los cuales se hallan distantes al sistema interconectado nacional (SIN), por esta razón se emplean combustibles de origen fósil provenientes de las plantas de refinación de Barrancabermeja y Cartagena, como lo son el Diésel y el gas natural.

Actualmente se emplean plantas de generación basadas en motores de combustión interna alternativos o en su defecto plantas de generación mediante turbinas de gas; plantas que son alimentadas con estos combustibles, los cuales necesariamente son transportados como crudo, procesados en refinación y finalmente transportados nuevamente para alimentar las plantas de generación de energía eléctrica.

Los campos petroleros colombianos actualmente poseen plantas de generación de energía con motores que van desde los 200 kW hasta los 6 MW instalados, utilizando como fuente de energía combustibles líquidos como el diésel como combustibles gaseosos como el gas natural.

La mayoría de los campos petroleros del país cuentan con diferentes equipos de generación con el fin de suplir de energía eléctrica sus instalaciones utilizando generadores acoplados a motores reciprocantes de combustión interna o centrales termoeléctricas. Estos equipos de generación se adecuan a combustibles bien conocidos como lo es el diésel y el gas natural o en su defecto iniciaron la masificación de sistemas duales diésel-gas natural.

Aún no se está utilizando GLP como combustible ya que debido a las variaciones en su composición no se puede utilizar fácilmente en equipos tradicionales de generación. Sin embargo, se está empezando a realizar pruebas piloto utilizando gas licuado de petróleo como combustible.

Dentro de las empresas que actualmente trabajan con generación de energía en campos petroleros utilizando motogeneradores se encuentran las siguientes:

- R2 Energy Solutions
- Surpetroil Controls S.A.S.
- Power Oil & Gas Ltda. Poilgas
- Power Group S.A.S.

- Ingenergía – Ingeniería Energética
- Cummins de los Andes

Los posibles usos del GLP de alto butano pueden contribuir a las necesidades de potencia de campos petroleros mejorando así su eficiencia energética, al minimizar en su mayoría el uso de combustibles procesados en refinación como el diésel.

En su mayoría, los equipos que requieren el uso de motores de combustión de combustión interna.

- Motores de pozos (Son los que suministran toda la potencia que se requiere en el proceso de perforación)
- Motores de bombas (Unidades de bombeo)
- Plantas de generación eléctrica
- Plantas de emergencia

3.8 Antecedentes uso de GLP en generación de energía en Colombia

Los motores de combustión interna alternativos pueden operar con diferentes configuraciones de combustibles, con gas o prácticamente cualquier combustible líquido según las diferentes pruebas que se han venido desarrollando. Pueden quemar el gas proveniente de diferentes yacimientos, gasoductos o particularmente de petróleo crudo de un yacimiento, así como también fuel-oil pesado o diésel. A su vez, los motores dual fuel pueden utilizar, de forma simultánea, gases de diferentes calidades y diversidad de combustibles líquidos. Sin embargo, estos temas aunque ya se están implementando a nivel mundial, es objeto de investigación en Colombia según las diferentes calidades de GLP.

Estas pruebas fueron realizadas por la empresa ESEI S.A., con el fin de implementar el uso de GLP como combustible en motores de combustión interna de las cuales no se tienen datos precisos por condiciones de privacidad.

Se realizó una prueba en la cual se buscó realizar un estudio comparativo de las tecnologías diésel y GLP para la generación de energía eléctrica en el municipio de Timbiquí en el departamento del Cauca cuyo responsable fue el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE. Estas se desarrollaron entre los años 2007 y 2009 y consistieron en generar de electricidad para zonas no

interconectadas, en donde se buscaba comparar el desempeño y consumo de dos unidades de generación; una alimentada con diésel de 150kW de potencia nominal y otra de 140kW alimentada mediante GLP almacenado en pipetas comerciales mediante evaporación espontánea.

Los dos motogeneradores se ensayaron sin protocolo de pruebas definido, durante el ensayo como soporte al sistema principal de generación del municipio de Timbiquí Cauca. Cada motogenerador se conectó a circuitos independientes con condiciones de carga diferente. El resultado de la prueba fue un análisis del consumo volumétrico de combustible por unidad de energía eléctrica generada (gal de combustible/kWh), los resultados son propiedad de Ecopetrol S.A.

Al realizar las pruebas de los motogeneradores se tuvo en cuenta que siempre operaron bajo condiciones de carga diferentes, de modo que no fue posible utilizar los resultados para realizar una comparación del funcionamiento de los mismos para todos sus rangos de carga.

Para finales del año 2009, se realizó un proyecto de generación con GLP en Isla Fuerte, departamento de Córdoba el cual fue dirigido por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE. Para ésta prueba, se utilizó un motogenerador marca GENERAC propiedad de la Electrificadora del Meta (EMSA) diseñado para utilizar GLP como combustible y con una potencia nominal de 120kW. Este equipo se probó durante 7 meses como parte del sistema de generación eléctrica de la isla durante un total de 1461 horas. Se concluyó que el costo del kWh generado era muy superior debido a la tecnología utilizada para áreas no interconectadas. Resultados propiedad de Ecopetrol S. A.

Para el año 2012, se realizaron pruebas de generación con GLP en campo la Hocha, Casanare. A cargo de la empresa Surpetroil SAS. El objetivo fue evaluar el desempeño de un grupo de motogeneradores CETEC CGN 505 de 367 kW de potencia continua con motores a gas Doosan V222TI de 410kW de potencia (prime) a 1800 rpm. Los motogeneradores utilizaron como combustible gas natural y comúnmente se emplean dentro de la industria petrolera para generación eléctrica en campo. Para el desarrollo de la prueba se opera el motogenerador usando como combustible una mezcla variable compuesta por GLP del campo Apiay y gas natural. Debido a las propiedades propias del GLP y teniendo en cuenta su composición química, valor calorífico e índices de compresión (número de metano), se observa que a las condiciones de operación definidas se generaban detonaciones en el motogenerador.

Como conclusión del desarrollo del ensayo se tiene que en comparación con el uso exclusivo de gas natural en los motogeneradores, al usar GLP como combustible se presenta una reducción considerable en la eficiencia de generación. Resultados propiedad de Ecopetrol S.A.

Para el año 2013 en el mes de enero, se realizó una prueba de generación de ocho horas de generación con GLP en campo Corcel, Casanare. Durante el desarrollo de éstos ensayos se utilizó un grupo de motogeneradores CETEC CGN 505 de 367 kW de potencia continua con motores a gas Doosan V222TI de 410kW de potencia (prime) a 1800 rpm.

Para este caso y de acuerdo a los resultados obtenidos realizó uno en la configuración de la relación de compresión del motor. Se utilizó GLP del campo Corcel (Petrominerales) como combustible.

Luego de realizar el ensayo se concluyó que posterior a las modificaciones en la configuración de la relación de compresión al motor mejora su eficiencia de generación.

Todos los ensayos anteriores fueron desarrollados implementado GLP colombiano de diferentes yacimiento con un porcentaje de butano inferior al de Cusiana, donde a la fecha no se ha probado motogeneradores debido al alto porcentaje de butano que contiene.

3.9 Normatividad Internacional para Motores de Combustión Interna

La identificación de variables y procedimientos del protocolo de pruebas se realiza por correlación entre requerimientos y variables establecidas por las normas: ISO 8528 sobre grupos generadores de corriente alterna movidos con motores reciprocantes de combustión interna (motogeneradores), y la ISO 15550 sobre métodos de monitoreo de variables, medida de potencia y cálculo de rendimiento de motores reciprocantes de combustión interna.

➤ ISO 15550

La norma ISO 15550 conocida como la norma base a nivel internacional para desempeño mecánico de motores detalla los requerimientos, condiciones de referencia y métodos de

cálculo de la potencia, consumo de combustible, consumo de aceite lubricante y método de ensayo para motores de combustión interna que utilizan combustibles líquidos o gaseosos.

De las variables que establece la norma, se discriminaron las que por motivos de logística de la prueba no fue posible monitorear ya que no se tuvo la totalidad de la instrumentación, ni las condiciones requeridas por la norma para la realización de la prueba. Sin embargo, la que se monitorearon, suministran la información necesaria para establecer un comportamiento energético del motor Waukesha.

Esta norma es aplicable para motores con aspiración natural o que utilizan aire turbo cargado y básicamente se utiliza para motores dinámicos (automotores), pero también para motores sometidos a prueba estática que es el caso que aplica en esta investigación.

Como se mencionó anteriormente, se extraen de la norma las variables a monitorear para poder realizar el análisis de comportamiento energético del motor sobre el motogenerador, resaltando que no se cumple estrictamente las condiciones ambientales de temperatura y presión ya que la prueba se desarrolla al aire libre sin condiciones de laboratorio controladas.

➤ ISO 8528

La norma ISO 8528 define de los requerimientos que hay para grupos electrógenos (motogeneradores), en cuanto a su aplicación y evaluación de motores de combustión interna acoplados a generadores de corriente alterna con su respectivo sistema de control asociado.

Se aplica tanto para motogeneradores utilizados en aplicaciones marítimas como fijas en tierra y en usos aeronáuticos. Esta norma está compuesta por partes que agregan requisitos adicionales según la aplicación.

3.10 Variables que afectan el comportamiento energético de los MEP

3.10.1 Fundamentos de combustión

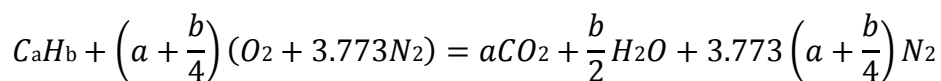
Se denomina combustión la evento físico-químico que tiene lugar en el interior del cilindro en el cual a una mezcla en una proporción determinada de aire-combustible, se le adiciona

una gran cantidad de energía externa para que los componentes que conforman la molécula de hidrocarburo se separen y se unan en forma individual al oxígeno, generando el denominado calor de combustión.

En ciclo Otto, la mezcla aire-combustible es introducida en la cámara de cilindro, en el cual es pistón comprime la mezcla con el fin de aumentar la presión. En el instante de alcanzar la mayor presión, con lo cual se ha incrementado la temperatura de la mezcla, se hace saltar una chispa eléctrica la cual aporta la energía necesaria para que las moléculas más cercanas a la chispa se dividan y los componentes se unan al oxígeno generando calor. La combustión no es instantánea; es gradual debido a la reacción en cadena, lo que explica el adelanto de chispa que opera en todos los motores para permitir que el combustible se halla quemado, cuando al pistón ha alcanzado el punto superior (PMS). Es este calor generado a su vez, suministra la energía a las subsecuentes moléculas de hidrocarburo, estableciendo así una reacción en cadena

El cociente entre la cantidad de aire que necesita 1 kilogramo de combustible para su combustión completa está definida como la relación aire-combustible (A/F). Representa la dosificación teórica real o ideal, o bien, la llamada *relación estequiometría*.

En general la combustión de un hidrocarburo C_aH_b se cumple en la siguiente ecuación:



La relación de aire-combustible se obtiene a partir de la masa de aire y de combustible:

$$A/F = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{\text{mol de aire}}{\text{mol de combustible}} * \frac{28,57}{12a + b}$$

La relación entre las cantidades de combustible y de aire suministradas a un proceso de combustión está determinada también por la relación de equivalencia Φ . Por definición:

$$\Phi = (F/A)$$

Donde el numerador representa la relación de combustible y de aire utilizada en condiciones de combustión reales, y el denominador es el valor estequiometrico o químicamente correcto. El valor de Φ es menor que 1, si se emplea en exceso de oxidante

tal como aire u oxígeno; a esta se le llama también *mezcla pobre*. Una mezcla rica es aquella en que Φ es mayor que 1 y el combustible excede el requerimiento estequiométrico.

En el estudio de motores de combustión interna, suele definirse también como la relación λ como:

$$\lambda = \Phi^{-1}$$

Para mezclas pobres: $\Phi < 1, \lambda > 1$

Para mezclas estequiométricas: $\Phi = \lambda = 1$

Para mezclas ricas: $\Phi > 1, \lambda < 1$

En la combustión incompleta del carbono de un combustible, este reacciona según la ecuación $c + 1/2 O_2$. Como el oxígeno tiene mayor afinidad para combinarse con el hidrógeno que con el carbono, normalmente todo el hidrógeno de un combustible se convierte en agua.

Si la cantidad de oxígeno no es la suficiente para garantizar una combustión completa, es siempre el carbono el que no reacciona completamente. En la práctica, se encuentra CO entre los productos a pesar de que se haya suministrado un exceso de aire.

En los motores de combustión interna operando con gas natural comprimido, las relaciones de aire-combustible oscilan en un rango de 15:1 hasta 19:1 ó 20:1- Para estas relaciones de aire combustible, los valores de Φ correspondientes son 1.1 hasta 0,9, y los valores de λ respectivamente son 0,91 hasta 1,11.

En el caso de que Φ tome valor de 1.1, la cantidad de aire suministrado al proceso de combustión es inferior al teórico; es decir en este caso la cantidad de aire representa un 90% del aire teórico necesario para la combustión completa del combustible.

De acuerdo a esto las variables de operación que afectan el comportamiento energético de un motor de encendido provocado, para una carga y velocidad estables, las más destacadas son:

- a. Avance de Encendido.
- b. Relación aire – combustible.
- c. Fracción de gases de escape que son recirculados para el control de las emisiones de NOx.

Así pues la carga es variada mediante el cambio de la presión en el múltiple de admisión.

3.10.2 Avance de encendido en MEP

La variación del instante de encendido modifica la cantidad de mezcla que se quema antes y después de PMS, y por tanto ejerce una influencia notable en el trabajo desarrollado por el ciclo.

En la *Figura 14* se muestra como varían la temperatura y la presión máxima en un MEP, operando a 2000rpm y grado de admisión 0,5, al variar el instante de encendido. En la figura se ha marcado el instante de encendido así como también se ha sombreado una región que no es accesible en la práctica debido a la aparición de la combustión con autoinflamación.

Esta anomalía es comúnmente conocida como picado de biela, debido al ruido característico que lleva asociado. Conviene resaltar que el límite de esta región depende fuertemente de las condiciones de operación.

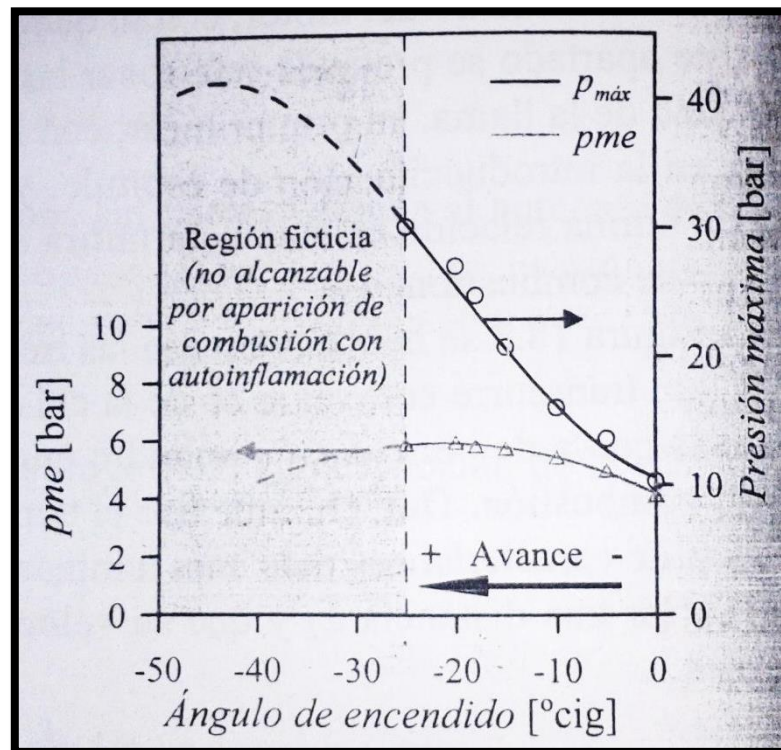


Figura 14: Evolución de la presión máxima y la pme en función del avance de encendido a régimen y grado de admisión constantes.

Fuente: Libro - Motores de Combustión Interna Alternativos de F. Payri y J.M. Desantes

La evolución de la presión máxima se puede explicar cómo sigue. Al ir avanzando el encendido ocurren dos cosas: por un lado crece la cantidad de masa que queda antes de PMS, con lo que la temperatura y la presión máximas en cámara tienden a crecer; por otro lado también crece la cantidad de calor transferido a las paredes antes del PMS, lo que produce el efecto contrario.

La combinación de ambos efectos es la que explica porque se incrementa la presión máxima a medida que se aumenta el avance de encendido hay que se supera un cierto límite, a partir del cual esta empieza a decrecer (se hace notar que este límite queda dentro de la región anteriormente mencionada y por tanto se trata de una evolución hipotética).

En lo que a evolución de PME se refiere, se observa que al ir avanzando el encendido llega a un valor máximo y pasado un determinado avance, esta empieza a decrecer. Cuando el avance es pequeño, la presión en el interior del cilindro sube demasiado tarde, de manera que no se saca el máximo provecho en la combustión. Cuando el avance es excesivo, sin embargo la presión en el cilindro se eleva demasiado pronto, dificultando incluso la subida del pistón al final de la fase de compresión.

Entre ambas situaciones extremas, ninguna de ellas conveniente, existe una situación óptima en la que se maximiza el aprovechamiento de la combustión (se maximiza tanto la PME como el rendimiento). En estas condiciones se dice que la combustión está centrada, y el avance es el óptimo.

Sin embargo, no siempre es posible utilizar una combustión centrada en la pme este optimizada. En efecto a medida que se incrementa el avance de encendido con la intención de llegar a esa situación óptima, tanto la presión como la temperatura máximas en el interior de la cámara de combustión crecen, incrementándose así el riesgo de aparición de la combustión con autoinflamación (por tanto, en esas determinadas condiciones el límite de la región ficticia mostrada en la *Figura 14* tendría lugar mucho antes de lo que ahí se ha representado, ubicándose a la derecha del máximo de la curva de PME).

El interés por evitar esta anomalía en el proceso de combustión obliga, en ocasiones, a operar con combustiones no suficientemente centradas y por tanto no completamente optimizadas. Algunos sistemas de encendido electrónico que equipan los MEP incluyen un sensor de autoencendido para evitar por un lado, la aparición de este fenómeno indeseable y, a su vez, para ser capaces de acercarse lo más posible al alcance óptimo en todas las condiciones de operación.

Así pues, si la combustión empieza muy rápido en el ciclo, el trabajo realizado por los gases sobre el pistón al final de la carrera de compresión es muy grande; si la combustión inicia muy tarde, la presión pico del cilindro es reducida y el trabajo en la carrera de expansión disminuye.

Existe un tiempo de encendido que da el máximo torque al motor a una velocidad, composición y rata de flujo fija, este es el denominado ángulo de avance de encendido para máximo torque al freno, donde se entrega además, la potencia máxima al freno y el mínimo consumo específico de combustible. En cada régimen de velocidad, cuando la chispa es avanzada desde un valor fijo inicial, el torque se aumenta hasta un máximo y luego disminuye.

El tiempo del Máximo Torque al Freno depende de la velocidad; si ésta aumenta, la chispa tiene que ser adelantada porque se incrementa la duración del proceso de combustión debido al ángulo del cigüeñal. Este tiempo también depende de la carga aplicada.

Si la carga y la presión del múltiple de admisión disminuyen, el tiempo de adelanto de la chispa debe ser adelantado para mantener óptimo el desempeño del motor.

El tiempo de encendido afecta la presión pico del cilindro y por lo tanto, las temperaturas pico de gases quemados y no quemados. Retardando éste tiempo desde el óptimo reduce estas variables. Además permite en control del NO_x, se puede controlar la detonación al reducir dicho lapso de tiempo.

La temperatura de gases de escape se afecta por el tiempo de encendido de la chispa ya que retardándolo desde el Máximo Torque al Freno se incrementa la temperatura de gases de escape y se disminuye la eficiencia del motor y las pérdidas de calor hacia las paredes de la cámara de combustión.

3.10.3 Riqueza de mezcla en MEP

La mezcla no quemada en el cilindro del motor consiste normalmente de combustible gaseoso o vaporizado como lo es el caso del GLP, aire y gases quemados. La fracción de gas

quemado es gas residual y algún escape recirculando usado para el control de NOx. La composición de la mezcla es más crítica durante la combustión, ya que determina el desarrollo del proceso de combustión que gobierna las características de operación del motor.

En un cilindro dado, existen variaciones en carga promedio ciclo a ciclo. Además, dentro de cada cilindro en un motor, el combustible, el aire, el gas residual, y el gas recirculado de escape no están completamente mezclados dando lugar a fluctuaciones significativas.

Es necesario considerar el efecto de los cambios de composición química de la mezcla en la operación del motor y en las características de las emisiones en dos regímenes.

- Mariposa totalmente abierta y plena carga
- Mariposa parcialmente abierta o carga parcial.

Para la primer condición, el consumo de aire es el máximo que el motor aspira. El flujo de combustible puede variar, pero el flujo de aire es fijado por las variables de ajuste del motor y el régimen de velocidad.

Para la segunda condición, el consumo de aire, el flujo de combustible y el gas recuperado de gases de escape pueden variar. La evaluación de los cambios en proporciones de mezcla a carga parcial debe ser realizada a carga y velocidades fijas.

4. Reconocimiento del equipo y Ejecución de la prueba

4.1 Sitio de Pruebas

Para él se desarrolló de la prueba de generación en campo Ecopetrol facilitó el contacto en un sitio ubicado a los alrededores de la ciudad de Bogotá, en las instalaciones de Alsabana – Facatativá. La ubicación exacta del sitio es en las siguientes coordenadas ($4^{\circ}52'58.88''$ N, $74^{\circ}19'58.08''$ O).



Figura 15: Ubicación geográfica del lugar de la prueba (Ecopetrol S.A. Complejo Mansilla Facatativá, Cundinamarca).

Fuente: Google Maps

El motogenerador Waukesha ubicado en las instalaciones de Alsabana fue colocado cerca de la zona de carga de cisternas de GLP, sitio en el que se realizó el montaje respectivo para el desarrollo de la prueba de generación con GLP de alto butano procedente del Campo Cusiana Ecopetrol.



Figura 16: Imagen del sitio donde se realizó en montaje para la prueba de generación con GLP de Cusiana
Fuente: Elaboración propia.



Figura 17: Rotonda de carga de camiones cisterna de GLP en Alsbana Instalaciones de Ecopetrol Complejo Mansilla.
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Montaje

Con el objetivo de realizar la prueba, buscando evaluar el comportamiento energético del motor del motogenerador cuando se emplea GLP de alto butano como combustible, se planteó un montaje general y una serie de actividades descritas en el protocolo de operación que se realizó basado en normatividad nacional internacional, NTC 1930, NTC 2016, ISO 15550 e ISO 8528.

Para el caso del motogenerador Waukesha se consideró el control propio del equipo, en torno a él se instalaron todos aquellos sensores que permitieron la medición de parámetros tales como: flujo volumétrico, presión, y temperatura de gas, temperatura y composición de gases de salida, características de la energía eléctrica generada, temperatura aceite, refrigerante y culata del motor, entre otras.

El montaje general se describe en la siguiente *Figura 18*, donde el GLP es suministrado por una cisterna de 11000 gal de capacidad, la cual a través de un válvula permite el suministro del gas a un tanque pulmón que controla y mantiene la presión aproximadamente constante durante la prueba (25 psi) con el fin de mantener homogénea la presión de suministro de combustible al motor.

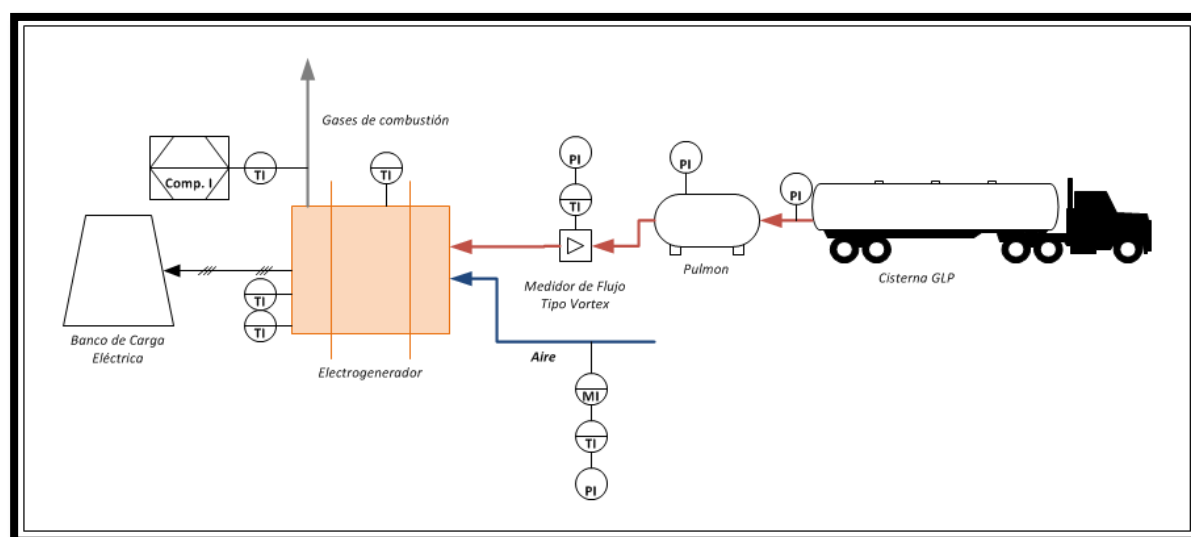


Figura 18: Montaje general para el desarrollo de la prueba a motogenerador Waukesha
Fuente: Elaboración Propia



Figura 19: Montaje general de pruebas de motogenerador Waukesha con GLP de alto butano de Cusiana

Fuente: Ecopetrol - Esei

La empresa Chilco Distribuidora de Gas y Energía S.A.S. realizó la instalación de alimentación del combustible GLP desde la cisterna hasta el medidor de flujo másico para gas (sensor Vortex), para ello se utilizó manguera de alta presión (400 psi) de 2" diámetro, la cual va conectada desde la salida de GLP gaseoso tomado de la parte superior del tanque. Un montaje para regulación de presión (primera etapa) en paralelo conectado a un tanque pulmón de 500 Gal. Este pulmón va conectado al medidor de flujo másico que controla que monitorea la presión, temperatura y flujo de gas que va ingresando al motogenerador.

El volumen inicial de GLP líquido fue de 10460 galones equivalente a un 91% del volumen total de la cisterna.

Características de adecuación de montaje de sistema de alimentación:

- Presión de gas a la salida de cisterna: 85 psi
- Temperatura de GLP a la salida de cisterna: 18° C
- Presión a la salida de regulador paralelo: 34 psi
- Volumen del tanque pulmón: 500 Galones
- Presión de de entrega de gas a medidor de flujo: 34 psi



*Figura 20: Conexión de manguera de 2" a cisterna de 11000 galones de GLP de alto butano
Fuente: Ecopetrol - Esei*

Una vez realizada la conexión, se realizó la verificación ausencia de fugas y se regularon las presiones requeridas para alimentar el motogenerador Waukesha.

Para llevar a cabo este montaje, la Empresa Chilco con experiencia en sistemas de alimentación a gas siguió la norma NFPA:58 en cuanto a dimensionamiento de mangueras, tuberías y normas de seguridad, la cual describe en su capítulo 3, los requerimientos para realizar un montaje con suministro de GLP como combustible.

Para dar inicio a la alimentación del sistema se realiza una descontaminación de sistema realizando una verificación en el *rotogage* de la cisterna y evacuando un poco de gas en la salida gaseosa de la cisterna.



Figura 21: Rotogage de tanque de almacenamiento de GLP
Fuente:

El *rotogage* es una galga rotativa diseñada para proporcionar una determinación precisa de contenido de GLP en la cisterna. Para operar esta galga, se abre una válvula de respiración y se gira lentamente el tubo de nivel del espacio de GLP gaseoso de la cisterna al espacio de GLP líquido. La diferencia en apariencia de la descarga indica cuando se llega al nivel de líquido. El *Figura 22* puede ver cuando se realiza esta verificación.



Figura 22: Conexión de Cisterna de GLP con tanque pulmón homogenizador de presión y verificación de rotogage de cisterna de almacenamiento de GLP
Fuente: Ecopetrol – Esei

Para disminuir la presión de la cisterna a la que se requiere en el motogenerador, se realiza un montaje en paralelo que controla la presión (*presión estática*) de entrada al pulmón. Como lo muestra la *Figura 23*:



Figura 23: Regulador de presión en paralelo de GLP
Fuente: Ecopetrol - Esei

A la salida del tanque pulmón, el cual homogeniza la presión estática de GLP en estado gaseoso, la manguera conecta el GLP al medidor de flujo másico para gas sensor Vortex, con el cual funciona mediante Protocolo Hart para realizar el monitoreo de presión, temperatura y caudal de gas a condiciones normales (estándar).



Figura 24: Medidor de flujo másico para gas Vortex
Fuente: Ecopetrol - Esei

El motogenerador Waukesha, el cual es alimentado con el GLP de alto butano de Cusiana esta insonorizado en una cabina para aislamiento el ruido generado por el motor, pero tiene acceso por medio de seis puertas laterales con el fin de realizar labores de mantenimiento y puesta a punto del equipo. Este acceso también facilita el montaje de la instrumentación con la cual se hace el monitoreo de la prueba.

Fuera de la cabina, como se puede ver en la *Figura 25*, se puede ver el silenciador donde se realiza la toma de concentración de gases de escape, el cual va conectado al exhosto (tubo Vertical), También se encuentra fuera de la cabina el radiador el cual hace parte del sistema de enfriamiento, éste tiene posición vertical y accionado por un motor eléctrico en la parte inferior.

Al lado opuesto a la posición del radiador, se encuentra sobre la cabina las persianas que evacuan el calor generado interiormente por la radiación del motor y generador. En este punto de la cabina se encuentra el generador de corriente alterna el cual está separado por una pared por el cuarto de control de



Figura 25: Descripción de Motogenerador Waukesha Cabinado (Blanco) con radiador, exhosto y silenciador (Negro)
Fuente: Ecopetrol - Poilgas

En la siguiente imagen se evidencia la puesta a punto del sistema de enfriamiento del motogenerador. En la parte inferior de la tubería que comunica el radiador con el motor, se encuentra un medidor de flujo másico para gas, el cual conecta con el sistema de alimentación de combustible del motor. *Figura 26*



Figura 26: Motogenerador Waukesha acoplado a radiador
Fuente: Ecopetrol - Poilgas

El motogenerador Waukesha que se muestra de color naranja en la *Figura 27* y también se logra apreciar el montaje de la instrumentación que monitorea temperaturas en el bloque, culata, ruido y consumo de aire. Varias de estas señales son almacenadas por el sistema de adquisición de datos de National Instrument propiedad del laboratorio de plantas térmicas de la Universidad Nacional de Colombia.



Figura 27: Detalle interno de motogenerador Waukesha acoplamiento motor - generador
Fuente: Ecopetrol - Poilgas

La *Figura 28* muestra la conexión del sistema de medición de flujo para gas, con la tubería (color amarillo) que pertenece al sistema de alimentación del motor. El motor aparece en color naranja, y la tubería perteneciente al sistema de enfriamiento principal y secundario esta en azul.



Figura 28: Instalación de medidor de flujo másico para gas Vortex
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



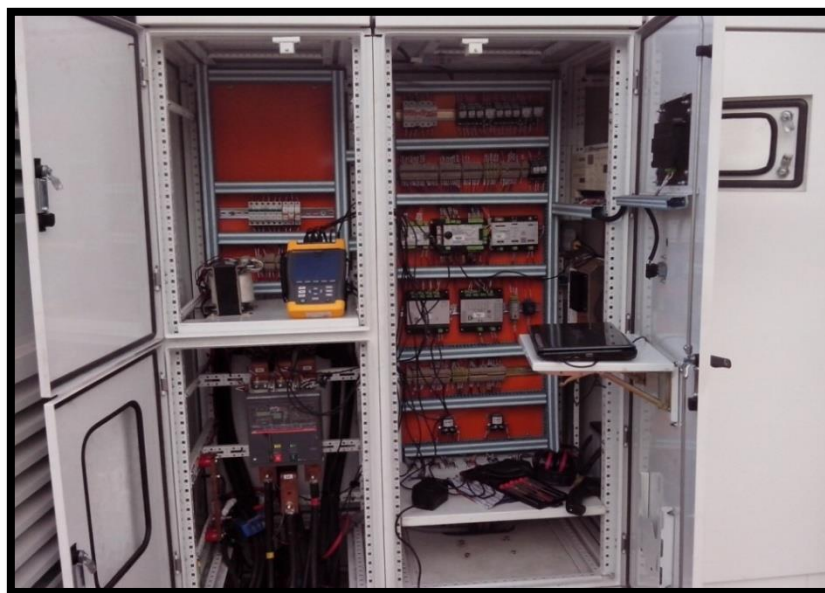
Figura 29: Montaje de sistema de adquisición de datos (National Instruments)
Fuente: Ecopetrol – Poligas

El banco de carga, propiedad de la empresa Poilgas con el cual se suministra la carga resistiva al motogenerador, marca Avtron el cual trabaja con una tensión de alimentación de 480V y con un juego de resistencias para 5 / 10 / 20 / 50 / 100 / 200 / 500 kW se utiliza en la implementación del protocolo de pruebas, el cual se muestra en la *Figura 30*.



*Figura 30: Banco de carga resistivo de 1 MW
Fuente: Ecopetrol - Poilgas*

Parte del montaje fue la utilización de un analizador de red, el cual permite monitorear la calidad de energía que se está generando durante la implementación del protocolo de prueba.



*Figura 31: Analizador de red (Fluke) conectado y recibiendo señal de banco de carga
Fuente: Ecopetrol - Poilgas*

4.3 Instrumentación y Adquisición de Datos

Para el desarrollo de la prueba y con el fin de realizar el monitoreo de los parámetros relevantes, que permiten el estudio energético del motogenerador; se realiza el montaje de la siguiente instrumentación teniendo en cuenta los equipos necesarios y disponibles para medir las variables requeridas.

EL flujo de gas pasa a través de un medidor de flujo tipo Vortex marca Optiswirl 4070 que adicionalmente reporta la presión y temperatura del gas. Por otro lado, ingresa al motor el aire necesario para la combustión; a este fluido se le mide la humedad relativa, temperatura y presión atmosférica por medio de un termohigrómetro Amprobe TR300. De esta manera, se da el proceso de combustión en el motogenerador, permitiendo la transformación de la energía química contenida en el combustible en energía mecánica dentro de los cilindros del motor. De este equipo se registraron las distintas temperaturas de aceite, refrigerante y culata, mediante el sistema de adquisición de datos (SAD) compuesto de una tarjeta National Instruments NI CDAQ-917 y un computador con el software Labview; así como la temperatura de los gases de combustión. Adicionalmente se emplearon un analizador Bacharach modelo 300 y un Portable GAS3100P Gas Analyser para registrar la composición de los gases de salida.

Mientras tanto, la energía mecánica aprovechada de la reacción de combustión se transfiere a un eje en el motor de combustión, el cual está a su vez conectado al generador eléctrico donde se da finalmente la conversión en energía eléctrica. Esta señal eléctrica es medida en función de la potencia entregada por el sistema al banco de cargas resistivas tipo Model K875A, y registrado por el personal técnico mediante un analizador de redes tipo Fluke 434/PWR. El esquema del montaje se presenta en la *Figura 18*.

Para la evaluación de las emisiones del motogenerador Waukesha se empleó un analizador de gases Portable Gas Analyzer 3100P y una termocupla tipo K. Con el primer dispositivo se desarrolló el seguimiento del porcentaje de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Oxígeno (O₂) e Hidrocarburos inquemados expresados como Hidrógeno (H₂), Metano (CH₄) y otros compuestos (C_nH_m) en los gases de combustión. Así mismo, la termocupla reporta la temperatura de los gases a la salida del motogenerador. Adicionalmente a esto se empleó un termohigrómetro Amprobe TR3000 para evaluar la temperatura del aire de admisión y la humedad relativa del ambiente.



*Figura 32: Analizador de gases bacharac
Fuente: Ecopetrol - Poilgas*



*Figura 33: Analizador de redes
Fuente: Ecopetrol - Poilgas*



Figura 34: Anemometro de hilo caliente y pirómetro
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 35: Línea de Suministro de GLP
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 36: Manometro presión de combustible y de aire
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 37: Medidor de Flujo Masico
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 38: Medidor de temperatura Ambiente y Humedad relativa
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 39: Sensor vortex
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 40: Sistema de adquisicion de datos
Fuente: Ecopetrol – Poilgas

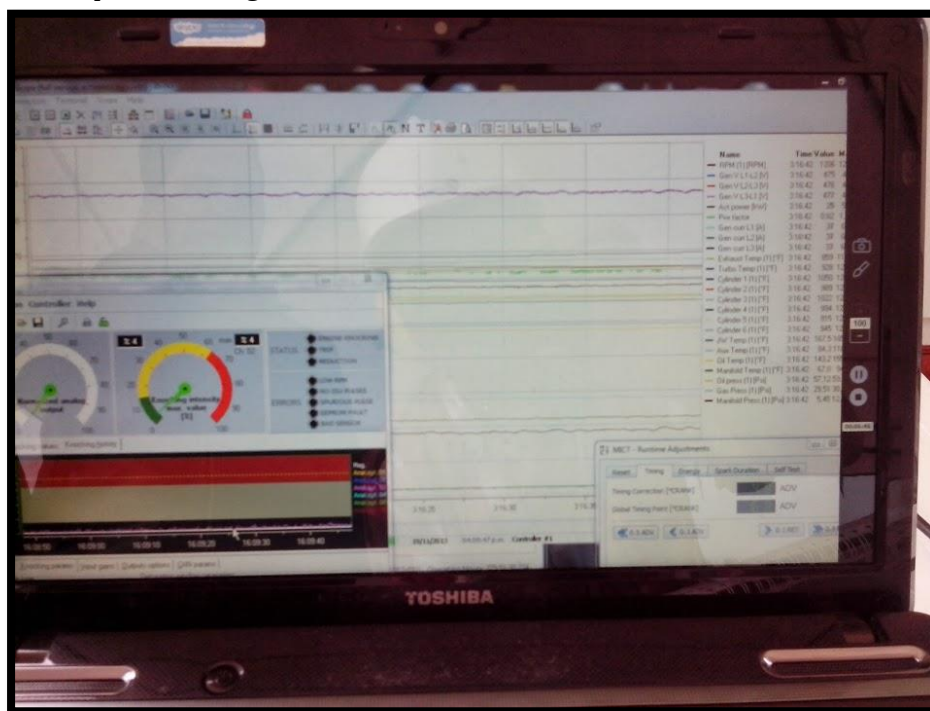


Figura 41: Software de unidad de control electronico para avance de encendido
Fuente: Ecopetrol – Poilgas



Figura 42: Toma de muestra para cromatografía
Fuente: Ecopetrol – Poilgas

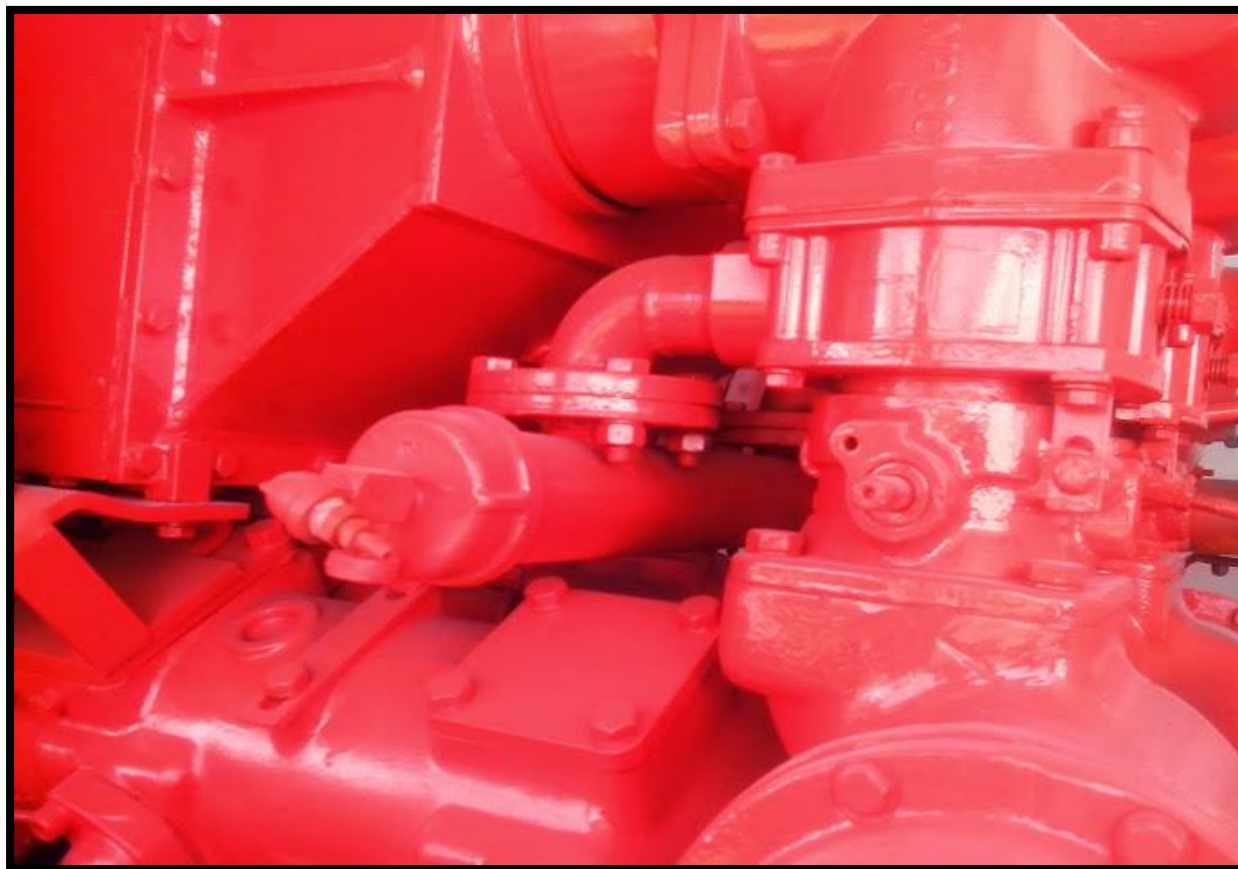


Figura 43: Tornillo de regulacion de caudal del cumbustible
Fuente: Ecopetrol – Poilgas

5. Ejecución de las pruebas bajo protocolo

5.1 Parámetros monitoreados

La siguiente es una lista de parámetros monitoreados necesarios para realizar es estudio energético del motogenerador en la ejecución de las pruebas bajo protocolo:

- Corriente eléctrica del generador
- Voltaje del generador
- Factor de potencia
- Potencia eléctrica activa
- Frecuencia
- Nivel de emisión de Ruido (exterior de cabina)
- Angulo de avance de encendido
- Velocidad del eje del motor
- Temperatura de la culata del motor
- Temperatura del bloque del motor
- Temperatura del aire ambiente durante el ensayo
- Temperatura del aire admitido en el motogenerador, después del filtro
- Temperatura del aire sobrecargado después del enfriador de aire
- Temperatura del aceite lubricante
- Temperatura del gas de escape en la salida del cilindro
- Temperatura de gases en el escape del motogenerador
- Presión del aire admitido en el motogenerador, después del filtro
- Presión del líquido refrigerante del motor
- Presión del aceite lubricante
- Presión de suministro de combustible
- Humedad relativa ambiente durante el ensayo
- Consumo de combustible
- Consumo de aire
- Concentración de emisiones en los gases de escape

5.2 Protocolo de pruebas

Revisar que todos los instrumentos están instalados

1. Inicializar los equipos de registro del sistema de adquisición de datos (SAD), banco de carga, analizador de gases, termohigrómetro, medidor de calidad de energía.
2. Sincronizar los relojes de los instrumentos de medición controlados por SAD.

3. Registrar la temperatura ambiente y humedad relativa del lugar al iniciar el ensayo.
4. Encender el equipo a vacío y registrar el comportamiento de las variables en esta condición hasta llegar a estado estable.
5. Aumentar la carga al 25% de la potencia nominal y registrar las condiciones de operación de forma manual. Si al momento de la prueba se deciden evaluar otros parámetros, dejar constancia de esto por escrito en la bitácora de operación.
6. Sin abandonar el monitoreo de las revoluciones instantáneas (lectura de velocidad en el generador, frecuencia, factor de potencia), verificar la temperatura y composición de gases de escape y el registro de las temperaturas internas y presiones en el sistema de adquisición de datos (SAD).
7. Aumentar la carga 25% de la potencia máxima y repetir paso 7.
8. Después de 10 minutos de estabilidad repetir el paso anterior hasta llegar al 100% de la potencia máxima.
9. Luego bajar la carga eléctrica del motogenerador al 0% (modo ralentí) y dejar refrigerar; Se esperan 5 minutos antes de apagar completamente para evitar daños en el generador.
10. Apagar el motor.
11. Esperar aproximadamente 10 minutos para realizar un nuevo transitorio de arranque en caliente, con una carga igual al 25% de la potencia máxima, registrando el comportamiento de las variables anteriormente observadas.
12. Después de 5 minutos, bajar la carga eléctrica y dejar refrigerar.
13. Consignar el estado de la pipa de almacenamiento de GLP.
14. Apagar los sensores.
15. Revisar el estado y ubicación de la instrumentación en general.

6. Análisis de Resultados

Con el objetivo de realizar el estudio de desempeño energético, es necesario realizar un análisis de los datos obtenidos con el fin de establecer una línea base de comportamiento del consumo de GLP de alto butano, superior al 45 % de *C4*, en función de la potencia eléctrica generada para cada uno de los puntos descritos en el protocolo. Del mismo modo es importante poder ver las emisiones que se generaron en esta prueba preliminar del motogenerador Waukesha.

6.1 Prueba de motogenerador con GLP de Cusiana bajo ajuste de parámetros de Gas Natural.

6.1.1 Eficiencia de Generación para motogenerador Waukesha

Se llevaron a cabo mediciones de consumo de combustible, composición de gases de combustión, características de aire de entrada al motor, relación aire combustible y energía eléctrica entregada.

Una vez realizado el montaje para la prueba al motogenerador Waukesha de acuerdo a la estructura del protocolo que se estableció, se parte de una condición de vacío en la cual existe una precarga dada por el motor del radiador vertical, el cual consta de un motor eléctrico de 35 kW. Luego de ello, se realizan incrementos de carga sucesivos de un 25% de la potencia total, la cual es de 500 kW (nominal).

La *Figura 26* nos presenta una curva de la potencia eléctrica generada en función del tiempo total de la prueba, el cual fue en su totalidad de dos horas. En ella se puede ver como se corre el protocolo anteriormente descrito bajo las condiciones de carga establecidas por la normatividad para pruebas de motogeneradores a nivel internacional.

Los transitorios de potencia utilizados en común acuerdo con el proveedor del motogenerador Waukesha (POILGAS) para las cargas de 25%, 50%, 75% y 100% fueron de 132 kW, 253kW, 377kW y 497kW respectivamente.

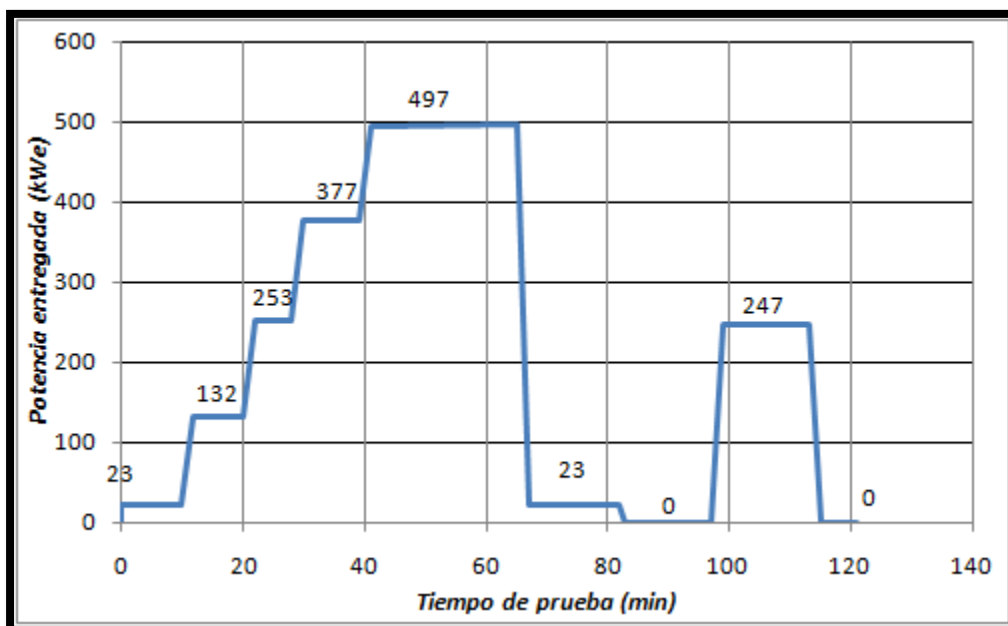


Figura 44: Variación de condiciones de carga según protocolo de pruebas para motogenerador Waukesha.

Fuente: Elaboración propia

Los datos de medición de combustible se muestran en la Tabla 7 en donde se puede ver una tendencia lineal en el consumo del combustible GLP de alto butano en función de la carga resistiva aplicada en el generador. Se puede ver como para una condición de carga en vacío el consumo horario de combustible es de 46,22 kg/h.

GLP	Potencia	% Carga Generado
kg/h	kWe	%
46,22	0	0
46,22	0	0
67,93	132	25
67,43	132	25
87,84	253	50
87,84	253	50
108,93	377	75
108,93	377	75
127,97	497	100
127,97	497	100

Tabla 10: Mediciones de consumo de combustible en función de la potencia eléctrica generada

Fuente: Elaboración Propia

Al representar estos resultados mediante una curva de tendencia, se puede ver que el comportamiento de los consumos al adicionar carga en realidad presenta un comportamiento lineal con una correlación de datos de 0.999, lo cual muestra una tendencia que permite proyectar un dato muy aproximado de las pérdidas de potencia presentes en el motogenerador mediante la línea de Willan.

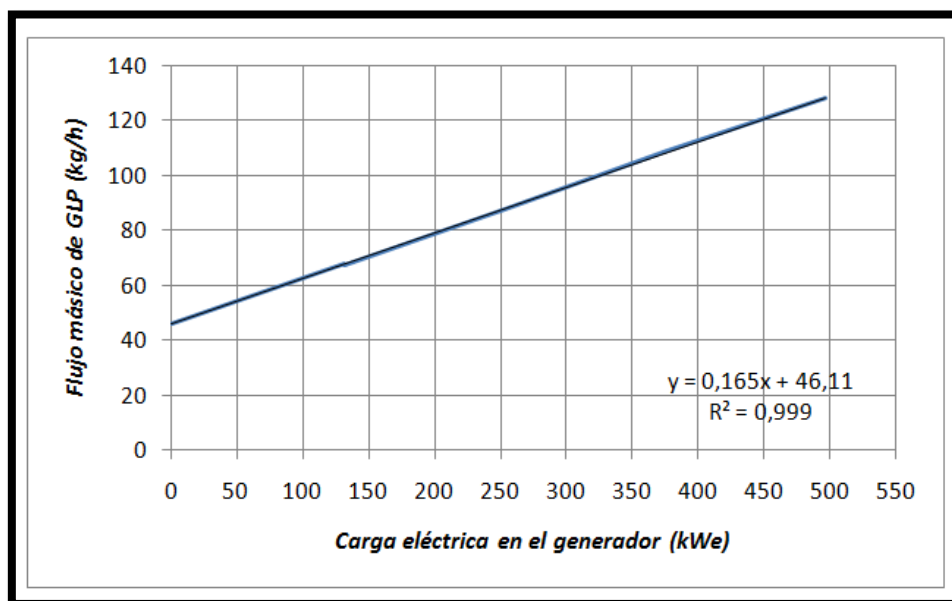


Figura 45: Consumo de GLP de alto butano en función de la carga eléctrica generada
Fuente: Elaboración propia

Al realizar la proyección de datos manteniendo la misma tendencia y correlación de datos, es posible determinar la suma de pérdidas de potencia tanto eléctrica como mecánica en el motogenerador. Esta proyección muestra que la línea de Willan se proyecta hasta cuando el flujo másico se hace cero mostrándo una potencia negativa.

Las pérdidas de potencia están descritas por la sumatoria de las perdidas eléctricas, de acuerdo a la eficiencia del generador y las perdidas mecánicas en el motor. Esto descrito por la ecuación:

$$fp = mfp + elp$$

Donde (fp) presenta la totalidad de las perdidas por fricción, (mfp) las perdidas por fricción mecánicas y (elp) las perdidas por fricción eléctricas. Las perdidas por fricción de acuerdo a la línea de Willan sería de 279 kW. La proyección de la Línea de Willian se muestra en la Figura 28.

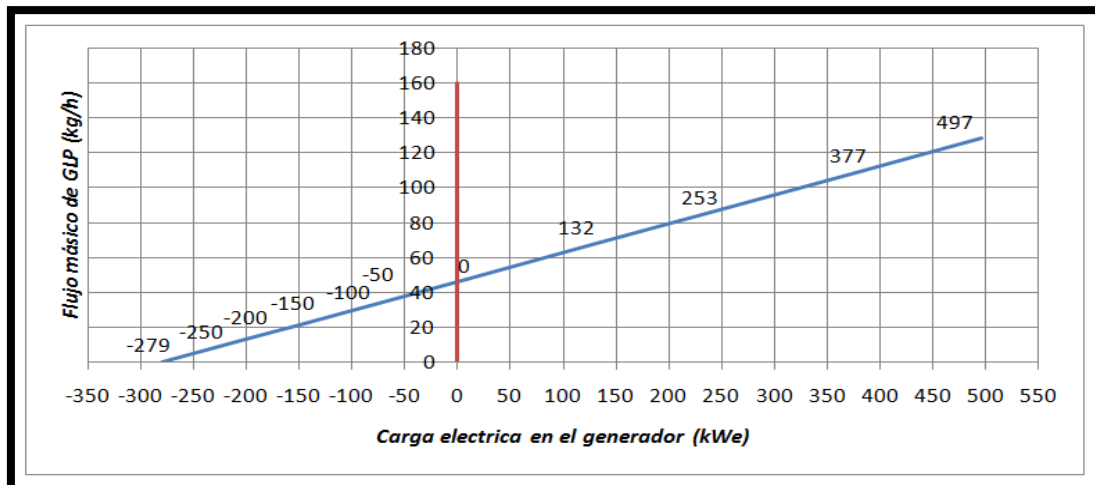


Figura 46: Línea de Willan para motogenerador Waukesha alimentado con GLP de alto butano

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de conversión para el motogenerador (motor acoplado a generador eléctrico) se calcula mediante el cociente entre la potencia eléctrica generada mediante la carga resistiva en el banco, entre el flujo del GLP multiplicado por el poder calorífico descrito en la cromatografía.

$$\eta_{e,f} = \frac{ep}{\dot{m} HHV}$$

Donde $\eta_{e,f}$ es la eficiencia del motogenerador (*adimensional*), ep es la potencia eléctrica en (kW), m es el flujo del combustible dado en (kg/h) y HHV es el poder calorífico del GLP de alto butano dado en (kWh/kg) relacionado en la tabla 11 y la figura 47.

Potencia del Combustible	Eficiencia Eléctrica. de Conversión
kW	%
642,07	0,00%
642,07	0,00%
943,66	13,99%
936,71	14,09%
1220,24	20,73%
1220,24	20,73%
1513,21	24,91%
1513,21	24,91%
1777,71	27,96%
1777,7	27,96%

Tabla 11: Datos de eficiencia de generación de energía eléctrica en función de la potencia del combustible

Fuente: Elaboración Propia

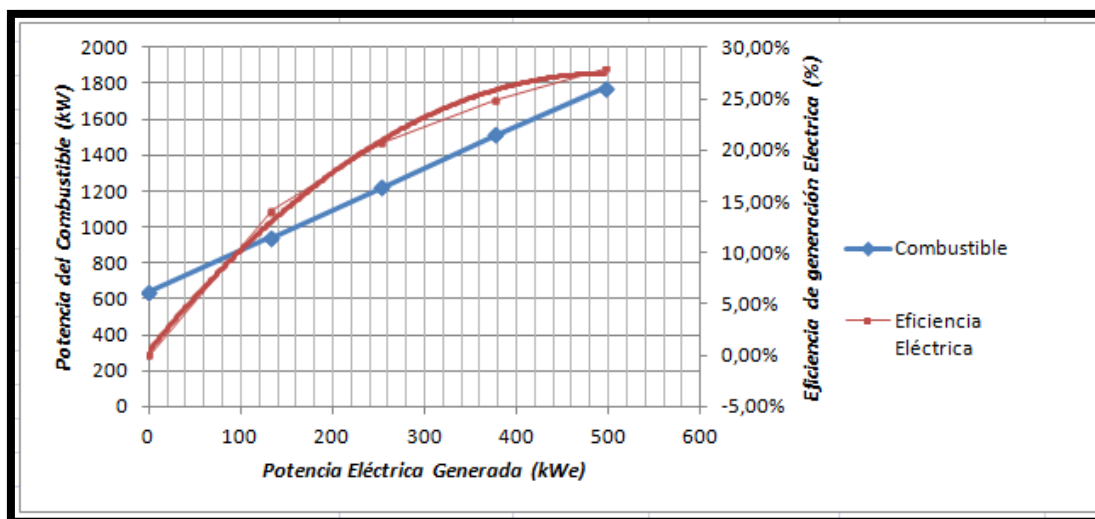


Figura 47: Comportamiento de Eficiencia de generación para motogenerador y potencia del combustible aplicada

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el cálculo de la eficiencia de conversión del combustible en el motor es necesario conocer la potencia indicada, la cual es la desarrollada dentro del cilindro del motor por la expansión de los gases de combustión. Esta dada por la relación:

$$ip = ep + fp$$

donde ip es la potencia indicada en (kW), ep es la potencia eléctrica y fp son las pérdidas por fricción obtenidas de la línea de William. Con éste dato de potencia es posible hallar la eficiencia térmica del motor.

$$\eta_{i,f} = \frac{ip}{\dot{m} HHV}$$

Donde $\eta_{i,f}$ es la eficiencia de conversión de combustible para el motor (*adimensional*), ip es la potencia indicada en (kW), \dot{m} es el flujo másico del combustible dado en (kg/h) y HHV es el poder calorífico del GLP de alto butano dado en (kWh/kg), A continuación se presentan los valores de la eficiencia obtenidos del modelo anterior.

<i>Potencia eléctrica generada</i>	<i>Eficiencia Indicada de motor</i>
<i>kWe</i>	<i>%</i>
0	0,00%
0	0,00%
132	32,08%
132	32,08%
253	47,52%
253	47,52%
377	57,43%
377	57,43%
497	64,01%
497	64,01%

*Tabla 12: Valores de eficiencia de motor teniendo en cuenta la potencia indicada
Fuente: Elaboración Propia*

Como ya se sabe, parte de la potencia desarrollada por la combustión del combustible en la expansión del cilindro es necesaria para vencer la fricción de las partes móviles del motor, por lo tanto la potencia disponible en el eje acoplado al generador es inferior a la potencia desarrollada en el cilindro. Esta relación de potencias y las eficiencias se relacionan mediante la siguiente Ecuación.

$$\eta_{th} * \eta_{GE} = \frac{ep}{ip}$$

Donde η_{th} es la eficiencia mecánica del motor y η_{GE} en la eficiencia del generador eléctrico. La multiplicación de estas eficiencias nos da la eficiencia total del sistema de generación, relacionada como el cociente de la potencia eléctrica entre la potencia efectiva desarrollada por los seis cilindros en línea del motor Waukesha empleando GLP de alto butano como combustible.

La eficiencia normal de una maquina eléctrica es de 90%. Para el caso de los generadores en un caso de aplicación continua tiene en promedio una eficiencia de 92.4% (marca Stamford), y en el caso de alta eficiencia llegan hasta los 96.2%. Si se asume una eficiencia de 92.4% para el caso del motogenerador Waukesha, se puede calcular la eficiencia indicada del motor.

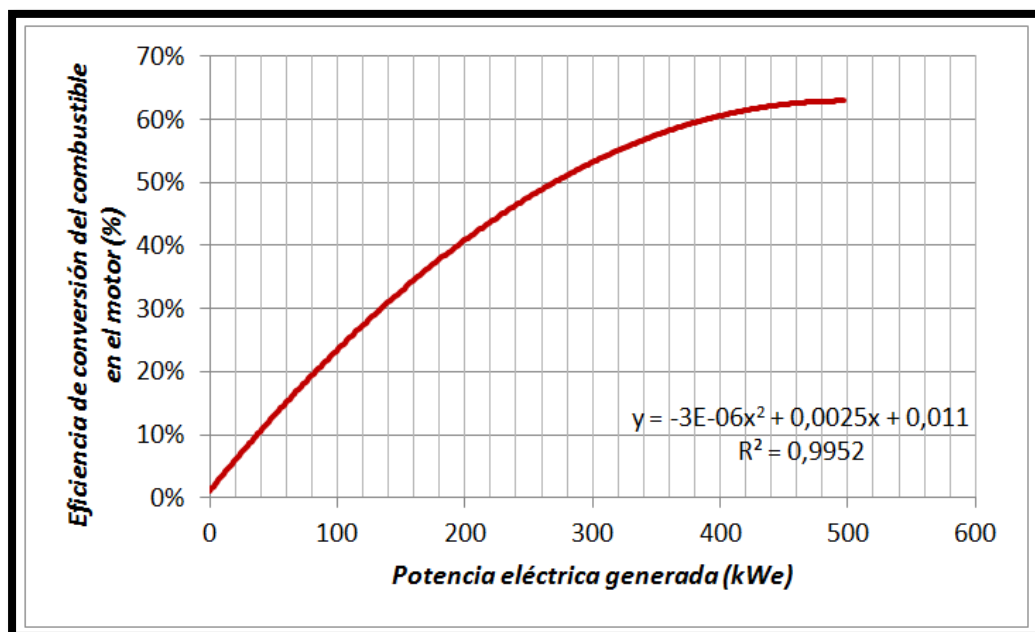


Figura 48: Curva de eficiencia térmica de motor Waukesha para potencia indicada
Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Balance de Masa y Energía de Motogenerador Waukesha

El Balance térmico determina la distribución de las varias clases de pérdidas de calor presentes en el motor de combustión interna. Esta energía térmica es liberada durante la combustión del combustible suministrado en el cilindro. Este balance térmico se realiza para cada una de las condiciones de carga descritas en el protocolo de pruebas.

La ecuación para el balance energético está representada de la siguiente forma:

$$E_i = W_{eje} + Q_{gases} + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{ref} + Q_{lub} + Q_{fric}$$

Dónde:

- W_{eje} es el trabajo útil realizado por el motogenerador Waukesha (Potencia Térmica)
- Q_{gases} es el flujo de calor desprendido en los gases de escape (Calor sensible e inquemados)
- Q_{rad} es el flujo de calor de radiación emitido por el motogenerador
- Q_{conv} es el flujo de calor debido a la transmisión por convección
- Q_{ref} es el flujo de calor transmitido al refrigerante
- Q_{lub} es el flujo de calor transmitido al lubricante
- Q_{fric} es el flujo debido a la fricción o pérdidas mecánicas

De donde se tiene la siguiente ecuación:

$$\sum \dot{m}_i * HHV_i = \frac{ep}{\dot{m}HHV_{fuel}} + \sum \dot{m}_{inq} * HHV_{inq} + \sum \dot{m}_{gases} * Cp_{gases} * \Delta T_{gases} + \sigma \epsilon A (T_e^4 - T_\infty^4) + hAdt + \dot{m}_{ref} * Cp_{ref} * \Delta T_{ref} + \dot{m}_{lub} * Cp_{lub} * \Delta T_{lub} + fp$$

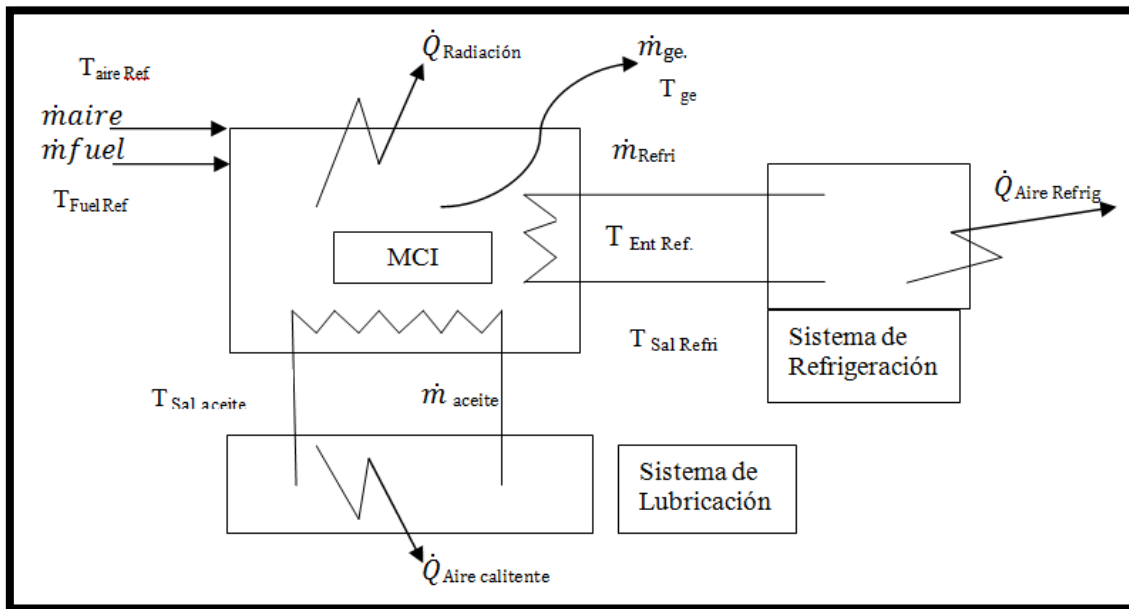


Figura 49: Planteamiento de balance de energía para motogenerador Waukesha.

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación anterior, debido a la geometría tan compleja del motogenerador y a razón de las variables que se lograron monitorear durante la prueba; ésta queda simplificada de la siguiente forma:

$$\sum \dot{m}_i * HHV_i = \frac{ep}{\dot{m}HHV_{fuel}} + \sum \dot{m}_{inq} * HHV_{inq} + \sum \dot{m}_{gases} * Cp_{gases} * \Delta T_{gases} + \dot{m}_{ref} * Cp_{ref} * \Delta T_{ref} + \dot{m}_{lub} * Cp_{lub} * \Delta T_{lub} + fp$$

De modo que no se tiene en cuenta el flujo de calor por radiación ni el flujo de calor convectivo, se tomaran como perdidas generales dentro de la distribución de energías totales del motogenerador.

6.1.3 Análisis de productos de la combustión

Se requiere realizar un análisis de los productos de la combustión con el fin de poder obtener la cantidad de energía disipada en los gases de escape, tanto por calor sensible, como por la energía térmica contenida en los inquemados durante la prueba.

La siguiente figura presenta la poca variación que se observó en las temperaturas de los gases y del aire de admisión durante los ensayos. Este comportamiento es característico para la prueba realizada al motor Waukesha.

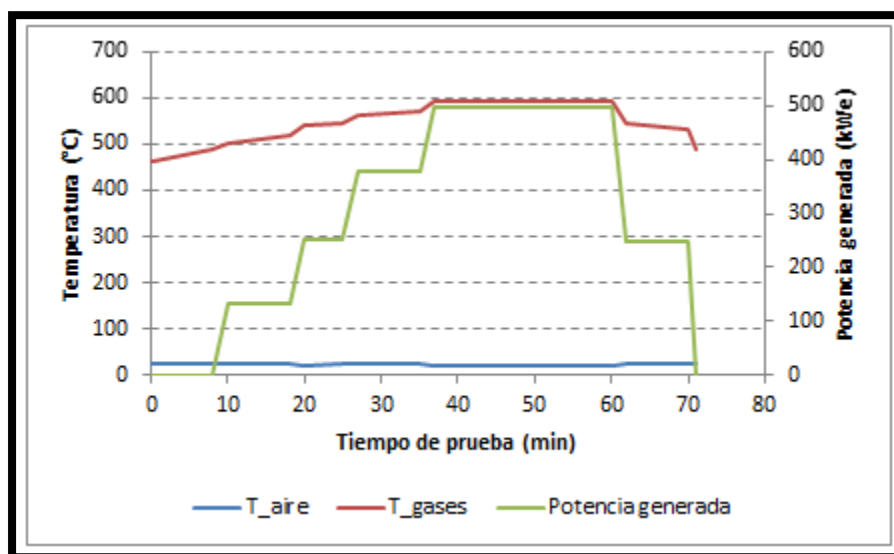
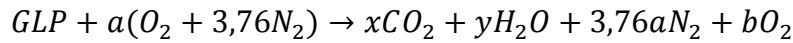


Figura 50: Relación de las temperaturas de los gases de escape y aire admisión con potencia generada para uso de GLP con parámetros de gas natural.

De la anterior figura se puede ver cómo tanto la temperatura del aire de admisión como la de gases de combustión se mantienen aproximadamente constantes durante toda la prueba sin importar el nivel de carga generado por el motor, $23,3 \pm 1,4^{\circ}\text{C}$ y $534,6 \pm 40,1^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Se puede ver un aumento progresivo de la temperatura de los gases de combustión relacionada con la inercia térmica del equipo durante el tiempo de prueba; sin embargo, encontrar temperaturas cercanas a $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ es algo normal para motores de combustión interna operados con combustibles gaseosos. Respecto a la humedad relativa durante el tiempo de ensayo, se presentaron algunos cambios durante la prueba; sin embargo en general este parámetro estuvo aproximado a $76 \pm 6\%$.

Para analizar las emisiones generadas del proceso de combustión de GLP, es necesario establecer un flujo de gases de chimenea teórico a partir de la ecuación general que

relaciona la reacción de combustión de la mezcla de gases descritos con anterioridad asumiendo presencia de aire en exceso. Los coeficientes a , x , y , b dependen en gran medida de la composición inicial del GLP dada por la cromatografía, también depende de la humedad relativa del aire y de la relación equivalente de aire-combustible (λ). Esto debido a que no se tiene información de la humedad que sale en los gases de combustión.



Teniendo en cuenta que el GLP empleado está constituido por C_2 , C_3 , C_4 , iC_4 , nC_4 y C_5 , N_2 es posible calcular un flujo de gases de combustión real como la suma del flujo de CO_2 (mCO_{2comb}) y H_2O (mH_2O_{comb}) generado de la reacción de cada uno de estos hidrocarburos, más el Oxígeno en exceso ($mO_{2exceso}$), Nitrógeno que ingresa en el aire (mN_{2aire}), N_2 del combustible ($mN_{2combustible}$) y la humedad del aire ($mhumaire$). Esto se resume en la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{CO_{2comb}} + \dot{m}_{H_2O_{comb}} + \dot{m}_{O_{2exceso}} + \dot{m}_{N_{2aire}} + \dot{m}_{N_{2combustible}} + \dot{m}_{humaire}$$

Para determinar, tanto el flujo de CO_2 como de H_2O generados, se debe tener en cuenta la reacción de combustión de cada uno de los componentes del GLP; así, este parámetro será la suma, del dióxido y del agua, generados de las reacciones del C_2 , C_3 , C_4 y C_5 .

$$\dot{m}_{CO_{2comb}} = MW_{CO_2} * \left(\frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_2}}{MW_{C_2}} * 2 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_3}}{MW_{C_3}} * 3 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_4}}{MW_{C_4}} * 4 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_5}}{MW_{C_5}} * 5 \right)$$

$$\dot{m}_{H_2O_{comb}} = MW_{H_2O} * \left(\frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_2}}{MW_{C_2}} * 3 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_3}}{MW_{C_3}} * 4 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_4}}{MW_{C_4}} * 5 + \frac{\dot{m}_{fuel} * X_{C_5}}{MW_{C_5}} * 6 \right)$$

En estas ecuaciones, \dot{m}_{fuel} [kg/h] es el flujo de combustible empleado, X_i es la fracción másica del componente i en el GLP (ver cromatografía), MW_i [kg/kmol] el peso molecular del componente i , mCO_{2comb} y mH_2O_{comb} [kg/h] los flujos de CO_2 y de H_2O generados por la combustión completa del GLP.

Para determinar el flujo de Oxígeno en exceso ($mO_{2exceso}$) se emplea la siguiente relación, donde $mO_{2ingreso}$ [kg/h] equivale al Oxígeno que ingresa en el aire al motor y $mO_{2combustión}$ [kg/h] es el Oxígeno que reacciona de la combustión de los diferentes hidrocarburos del GLP.

$$\dot{m}_{O_2 \text{exceso}} = \dot{m}_{O_2 \text{ingreso}} - \dot{m}_{O_2 \text{combustión}}$$

Se calcula el oxígeno que ingresa con el aire empleando la velocidad lineal de ingreso del aire (v), el área transversal del punto de ingreso en el filtro del aire (A) calculada como el producto entre la longitud y el ancho de la sección (60 x 5 cm) (Figura 51), la densidad promedio del aire a las condiciones de temperatura y presión de entrada ($1,2 \text{ kg/m}^3$), el flujo real de aire que ingresa al motor (m_{aire}), la humedad relativa del aire (x), presión de saturación del vapor (P_{sat}) a la temperatura de entrada del aire, y la presión atmosférica del lugar (P_{atm}), como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{\text{aire}} = \left(v * \frac{A}{10000} * \rho_{\text{aire}} \right)$$

$$\dot{m}_{O_2 \text{ingreso}} = \dot{m}_{\text{aire}} * \left(1 - \frac{x * P_{\text{saturación}}}{P_{\text{atm}}} \right) * 0,237$$

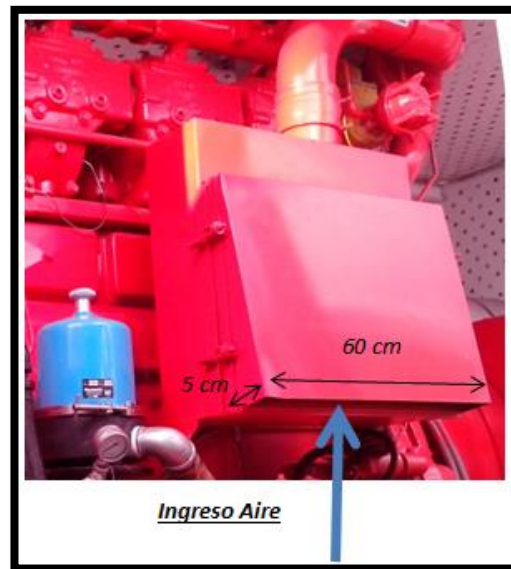


Figura 51: Lugar de ingreso de aire al motogenerador Waukesha
Fuente: Ecopetrol - Poligas

Mientras tanto el flujo de oxígeno consumido en las reacciones de combustión teóricas ($m_{O_2 \text{combustion}}$) estará dado por la siguiente relación.

$$\dot{m}_{O_2 \text{combustion}} = MW_{O_2} * \left(\frac{\dot{m}_{\text{fuel}} * X_{C_2}}{MW_{C_2}} * 3,5 + \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} * X_{C_3}}{MW_{C_3}} * 5 + \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} * X_{C_4}}{MW_{C_4}} * 6 + \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} * X_{C_5}}{MW_{C_5}} * 8 \right)$$

El flujo de Nitrógeno que ingresa al sistema estará dado por la suma del Nitrógeno que hace parte del combustible ($m_{N_2combustible}$) más el que ingresa en el aire (m_{N_2aire}), los cuales se calculan de la siguiente manera.

$$\dot{m}_{N_2combustible} = X_{N_2} * \dot{m}_{fuel}$$

$$\dot{m}_{N_2aire} = \dot{m}_{aire} * \left(1 - \frac{x * P_{saturación}}{P_{atm}} \right) * 0,763$$

Finalmente, para finalizar la determinación del flujo de gases de combustión (m_{gases}) se tiene en cuenta la humedad que ingresa al sistema en el aire del ambiente ($m_{humaire}$). Este flujo se evalúa en función de la humedad relativa (x), la presión parcial del vapor ($p_{parcial}$), la presión de saturación del vapor ($p_{saturación}$) a la temperatura de aire ($2575 Pa$), la presión atmosférica (P_{atm}) para Facatativá ($101340 Pa$) y el flujo de aire que ingresa al sistema (m_{aire})

$$\dot{m}_{humaire} = \dot{m}_{aire} * \left(\frac{p_{parcial}}{P_{atm}} \right) = \dot{m}_{aire} * \frac{p_{saturación} * x}{P_{atm}}$$

Una vez calculado el flujo de gases teórico que se genera por la combustión del GLP empleado, es posible establecer la cantidad de los diferentes gases generados por la combustión en el motogenerador. Esto se evalúa multiplicando las concentraciones del componente (X_i) dadas por el analizador Gas Analyzer 3100P por el flujo de gases (m_{gases}) menos los flujos de agua generada de la combustión ($m_{H_2Ocombustión}$) y de la humedad ($m_{humaire}$).

$$\dot{m}_i = (\dot{m}_{gases} - \dot{m}_{humaire} - \dot{m}_{H_2Ocombustión}) * X_i / 100$$

La siguiente tabla presenta un resumen de algunos de los datos recopilados de la prueba y empleados durante estos cálculos de flujos y emisiones.

% Carga	Potencia	Velocidad	T. gases	Humedad	CO	CO ₂	O ₂
	E _{elec}	V _{aire}		X	X _{co}	X _{co2}	X _{H2}
%	kWe	m/s	°C	%	%	%	%
0	0	8,3	463,89	64,2	4,80	4,50	8,50
0	0	7,3	490,00	62,2	4,80	4,50	8,50
25	132	7,8	503,89	77,0	4,75	4,93	7,87
25	132	8,9	517,78	78,7	4,75	4,93	7,87
50	253	13,9	541,11	80,7	4,79	6,98	6,61
50	253	12,8	544,44	79,0	4,79	6,98	6,61
75	377	16,4	562,22	80,0	3,61	7,64	6,74
75	377	16,3	570,56	79,4	3,61	7,64	6,74
100	497	20,2	594,44	79,2	4,61	7,16	6,52
100	497	20,3	593,89	79,0	4,61	7,16	6,52

Tabla 13: Resumen resultados de emisiones reportados durante prueba motogenerador Waukesha
Fuente: Elaboración Propia

Con base en estos datos, y siguiendo la metodología de cálculo anteriormente expuesta se determinaron los flujos de salida de los diversos compuestos en los gases de chimenea, agrupando las distintas concentraciones de H_2 , CH_4 y $CnHm$ como materiales in-quemado (HC). De esta manera es posible hacer un mejor análisis de resultados.

Potencia	CO	CO ₂	HC	N ₂	O ₂	H ₂ O
kWe	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h
0	49,41	46,32	5,75	768,88	174,99	76,38
0	43,32	40,61	10,59	676,61	153,42	67,59
132	45,08	46,79	27,90	720,11	149,19	89,51
132	51,69	53,65	22,30	821,28	171,28	100,93
253	81,90	119,34	4,61	1281,98	226,03	175,11
253	75,25	109,65	11,19	1181,07	207,68	161,57
377	72,73	153,93	16,77	1512,84	271,60	205,42
377	72,29	152,99	17,31	1503,86	269,93	203,95
497	114,58	177,96	7,21	1863,77	324,10	257,82
497	115,17	178,88	6,60	1873,10	325,78	258,87

Tabla 14: Emisiones generadas por el motogenerador Waukesha separadas por componente
Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla presenta el resumen de los flujos de combustible y aire que entran al sistema Waukesha, los flujos de los gases de chimenea obtenidos, y la relación de equivalencia (λ) la cual esta dada por la relación.

$$\lambda = \frac{\frac{A}{F}}{F_{Stoich}}$$

Donde (A) es el flujo másico de aire, F el flujo de másico de combustible y (F_{Stoich}) es el combustible teórico para la relación estequimétrica

Potencia	LPG	Aire	Gases chimenea	Rel Equiv
<i>kWe</i>	<i>Kg/h</i>	<i>Kg/h</i>	<i>Kg/h</i>	λ
0	46,22	1075,68	1121,73	1,53
0	46,22	946,08	992,13	1,34
132	67,93	1010,88	1078,57	0,98
132	67,43	1153,44	1221,13	1,12
253	87,84	1801,44	1888,96	1,35
253	87,84	1658,88	1746,40	1,24
377	108,93	2125,44	2233,29	1,29
377	108,93	2112,48	2229,33	1,28
497	127,97	2617,92	2745,44	1,34
497	127,97	2630,88	2758,40	1,35

Tabla 15: Flujos de combustible, aire y gases de combustión generados en ensayo para motor Waukesha
Fuente: Elaboración propia

Así se puede ver como el máximo consumo de combustible para este motor está alrededor de 127,97 Kg/h, con una demanda aproximada de 3400 Kg/h de aire y una generación de gases cercana a 2758 Kg/h para producir 497 kWe. Así mismo se ve de esta tabla como la sola operación del equipo en vacío requiere un consumo de GLP equivalente a 46,2 Kg/h emitiendo 1120 Kg/h de gases de chimenea al ambiente con niveles de CO y CO₂ del orden de 69 y 65 Kg/h aproximadamente.

El comportamiento de las emisiones en función de la potencia generada muestra un aumento progresivo en todos los compuestos. Quizá el más preponderante es el CO₂, el cual aumenta de 46 a 178,9 46,2 Kg/h con el incremento en la potencia de generación (Figura 3A). Por otro lado el CO, presenta similar comportamiento pasando de 49 a 115 46,2 Kg/h (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*), pero con mayores desviaciones a niveles de carga media.

La producción de CO es de especial atención puesto que su aumento no solo puede generar problemas de salud al personal en el área, sino que adicionalmente representa niveles de combustión incompleta y, como se mostrará más adelante, generan pérdidas energéticas en el sistema.

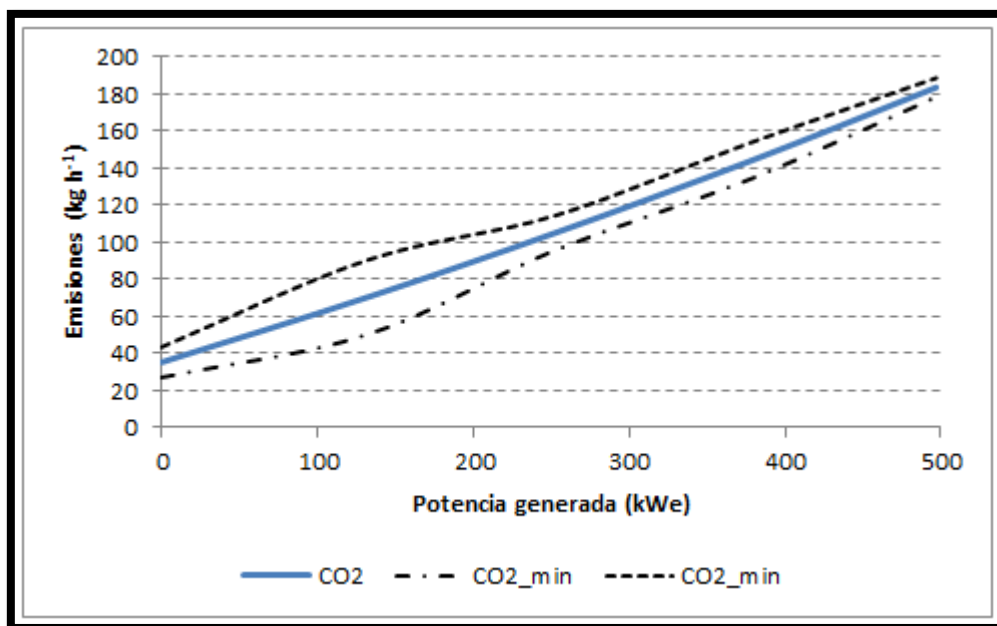


Figura 52: Niveles de CO₂ generados en las emisiones en función de la potencia eléctrica motor Waukesha

Fuente: Elaboración Propia

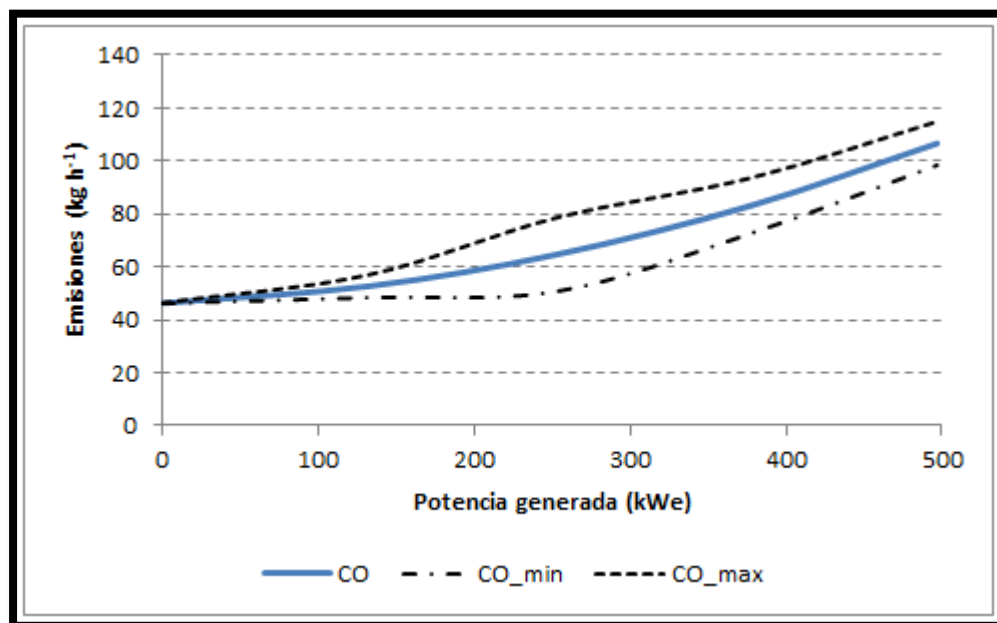


Figura 53: Niveles de CO generados en las emisiones en función de la potencia eléctrica motor Waukesha

Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al material inquemado se presentan algunas variaciones donde estos tienen una leve dependencia con la relación aire-combustible (λ). Para aquellos puntos en los cuales este parámetro fue menor a 1,2 se dieron niveles de producción por debajo de 20 kg/h, diferente a lo sucedido en el punto de 120kWe, donde la relación de equivalencia fue cercana y levemente menor a 1. Lo cual es congruente con el hecho de que a relaciones de aire combustible menores a las estequiométricas, la cantidad de material no quemado aumente ligeramente; el material inquemado, al igual que el CO presente en el gas de combustión representa algunas pérdidas energéticas.

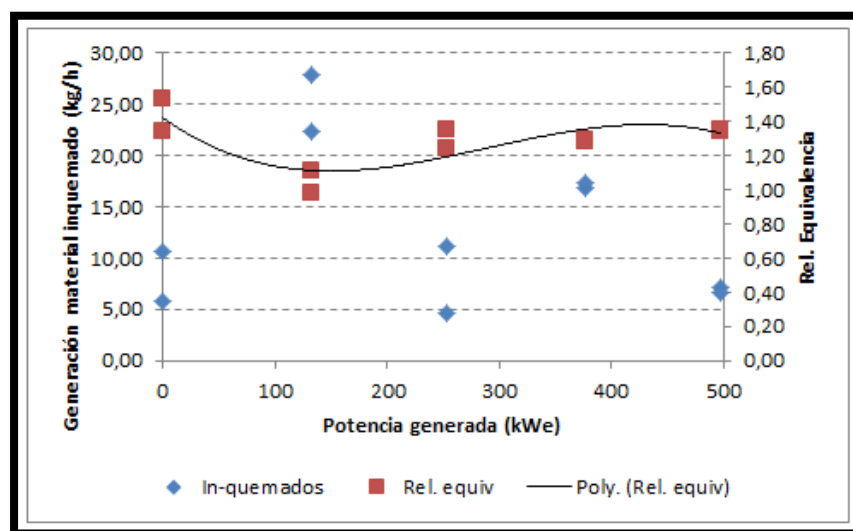


Figura 54: Niveles de material no-quemado en las emisiones en función de la potencia eléctrica y relación equivalencia motor Waukesha

Fuente: Elaboración Propia

6.1.4 Evaluación energética del sistema y pérdidas por gases de escape

Ahora, se analiza la energía perdida en los gases de escape y se compara con la energía suministrada por el combustible. Esto con el ánimo de identificar la incidencia que tiene la cantidad de CO, H₂ y CH₄ no quemados en el gas de escape, así como la energía relativa a las altas temperaturas de los gases. Para cada uno de los puntos tomados se evaluó la energía remanente que aún poseen los gases de combustión y la energía almacenada como calor sensible. Debido a que los gases contienen CO e hidrocarburos (HC) no quemados poseen potencial energético remanente, este se calcula con la siguiente relación.

$$\dot{E}_{inquemados}(kW) = \frac{\dot{m}_{CO} * LHV_{CO} + \dot{m}_{HC} * LHV_{HC}}{3600}$$

Donde, m_{CO} kg/h equivale al flujo de CO generado en las emisiones, LHV_{CO} kJ/kg es el poder calorífico de CO, m_{HC} kg/h el flujo de in-quemados en las emisiones, LHV_{HC} el poder calorífico de los in-quemados (asumido igual a 44000 kJ/kg). Así mismo, se evalúa la energía relacionada con la temperatura de los gases de combustión como el producto del calor específico de cada uno de los compuestos Cp_i $kJ/kg^{\circ}K$ desde la temperatura de alimentación T_{amb} ($^{\circ}C$) a la temperatura de gases de escape T_{gases} ($^{\circ}C$).

$$\dot{E}_{gases}(kW) = \frac{\sum \dot{m}_i * Cp_i * (T_{gases} - T_{amb})}{3600}$$

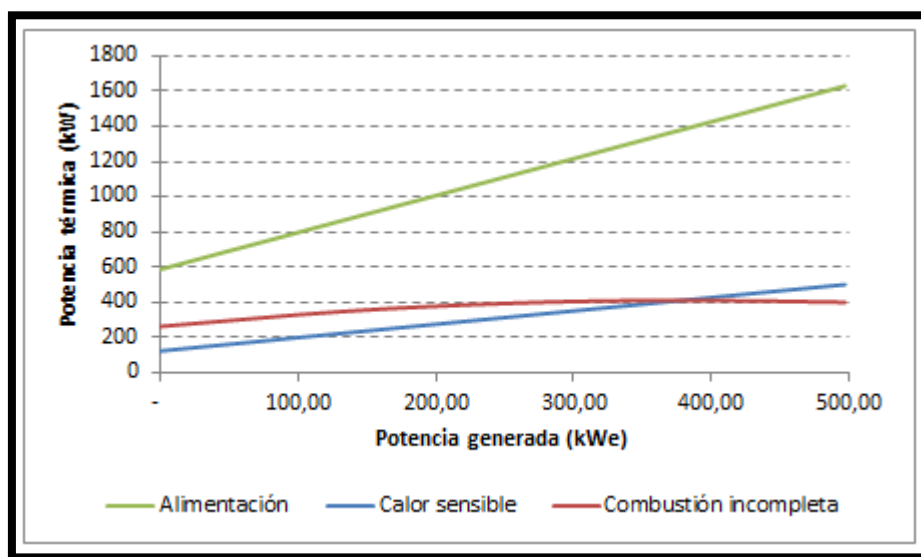


Figura 55: Distribución de la potencia térmica de alimentación y las pérdidas energéticas como calor sensible y compuestos derivados de la combustión incompleta en el motor Waukesha
Fuente: Elaboración Propia

La potencia que se pierde en los gases de combustión debido a las altas temperaturas varía entre 160 ± 10 y 520 ± 10 kW dependiendo de la potencia generada entregada y de la alimentación de combustible. Así mismo se puede ver de la anterior figura la importancia de evaluar o modificar la relación aire combustible, de tal manera que se promueva una combustión incompleta. Esto teniendo en cuenta los bajos niveles de equivalencia Aire

Combustible (λ), la potencia perdida como resultado de los compuestos inquemados y del CO presentes en los gases de combustión. Este último parámetro presenta un aumento desde 209 ± 30 hasta 400 ± 50 kW a medida que aumenta la potencia eléctrica.

El siguiente diagrama ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*** resume el porcentaje e distribución de potencia y de energía en el punto de máxima carga, comparando la potencia eléctrica generada, las perdidas por calor sensible, material no quemado completamente y otras perdidas. Estas últimas están asociadas con el calor cedido al ambiente por las paredes del equipo mediante radiación, convección, el calor cedido al refrigerante durante la operación y otras perdidas mecánicas. Como se puede ver en este equipo, aproximadamente el 30% de la energía alimentada en el combustible se transforma en energía eléctrica, 25% se pierde debido a la combustión incompleta, 32% como pérdidas por calor sensible en los gases de combustión y el restante 13% en demás perdidas.

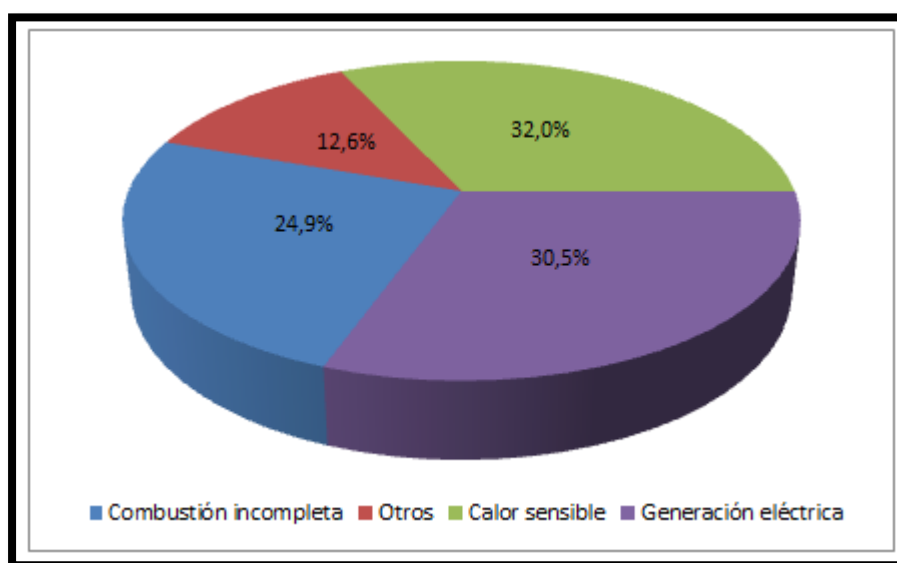


Figura 56: Distribución energética para el motogenerador Waukesha operado a máxima carga con GLP

Fuente: Elaboración Propia

6.2 Prueba modificando parámetros de ajuste de motor a GLP de alto butano

La búsqueda de la sensibilidad del motor tiene por objeto el tener una idea de la influencia que hay sobre la temperatura de los gases de escape y sobre el consumo de combustible, mediante el ajuste de los parámetros de regulación del motor. Este procedimiento se realiza bajo la autorización y supervisión del proveedor del motor basándonos en la normatividad de la ISO 8528. El ángulo de avance encendido y la relación aire combustible son los que se consideran como alcance de esta investigación.

Para lo último, se trabajó con el tornillo de regulación en el mezclador. Se varió el avance de la chispa entre los valores 12° como base de ajuste para gas natural y 22°, tomando como punto central el establecido por defecto para el motor; el tornillo de regulación se varió entre 1,5 y 5 vueltas. Durante las pruebas de sensibilidad, las variables ambientales y la velocidad del aire de admisión tuvieron los valores que en la Tabla 16 se consignan.

Punto	Carga	Ángulo de avance	Nº de vueltas mezcla	Temperatura ambiente [°C]	Humedad relativa [%]	Velocidad aire admisión [m/s]	Temperatura aire [°C]
1ª	75,00%	12º	5 Vueltas				
2ª		8º	5 Vueltas	14,8	73,45	24,15	21,85
3ª		8º	2 ½ Vueltas	13,4	76,2	19,2	23,6
4ª		16º	2 ½ Vueltas	13,55	73,2	18,9	24,95
5ª		16º	1 ½ Vueltas	13,4	71,35	20	24,3

Tabla 16: variables ambientales y la velocidad del aire de admisión durante la prueba
Fuente: Elaboración Propia

6.2.1 Ajuste de avance de encendido de motor Waukesha

El motogenerador Waukesha posee un controlador Custom Engine Control (CEC) que permite realizar control sobre variables como el avance de encendido de motor para ajustar el tiempo de ignición de la chispa respecto al punto muerto superior, además de ofrecer un mejor arranque del motor al hacerlo más suave, también de proteger el motor de posibles problemas como la detonación, además de ello funciona como un sistema de protección para extender la vida útil del motor.

En la siguiente grafica podemos ver las diferentes posiciones de avance de chispa respecto al punto muerto superior en donde en rojo, aparece el valor que se utiliza para gas natural y en azul los valores que se tomaron para el GLP de Cusiana que se utilizó durante la prueba.

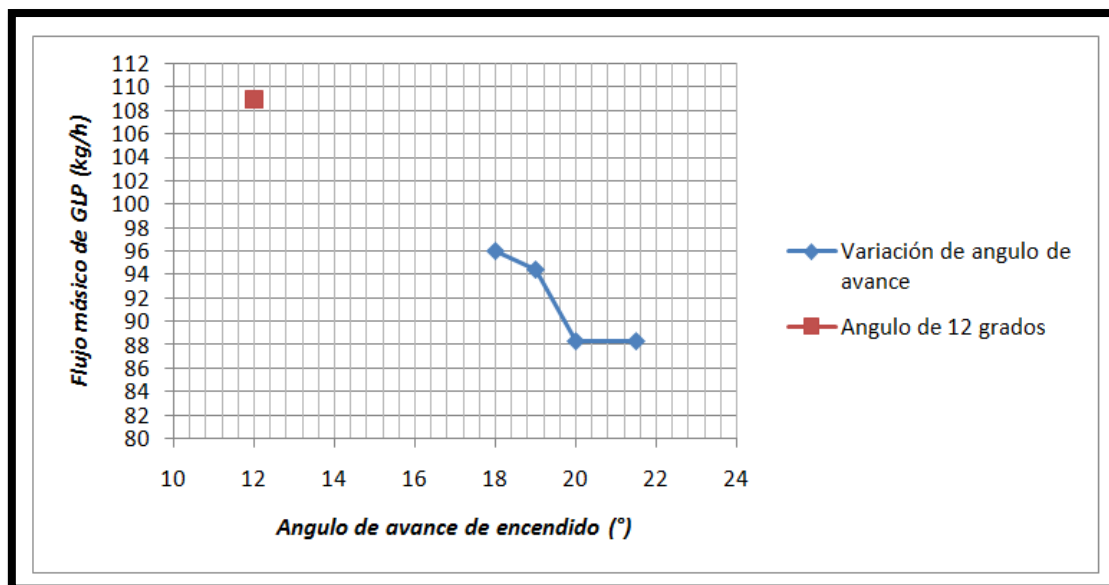


Figura 57: Consumo de GLP de alto butano a una carga de 75% ajustando ángulo de avance de encendido.

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver el impacto que genera sobre el consumo de combustible, siendo trabajado el motogenerador para una carga fija de 75 kW. Se minimiza el consumo de combustible de 108 kg/h a 96 kg/h, manteniéndose el motogenerador en funcionamiento sin presentar derrateo de motor.

En la Tabla 18 se puede ver la relación entre los diferentes ángulos de avance de encendido que se probaron para una misma condición de carga vs el flujo másico de combustible GLP. También se muestra el consumo para dos condiciones de carga menores, ya que por consideración del proveedor del motor se prueba para un régimen de 50 y 25%.

Carga	Ángulo de Avance	GLP
(%)	(°)	(kg/h)
75	18	96,04
75	19	94,41

75	20	88,29
75	21,5	88,29
50	22	66,06
25	22	46,08

Tabla 17: Variación de ángulo de avance de encendido en función de la carga aplicada
Fuente: Elaboración propia

Como es de esperarse, el impacto sobre el flujo de combustible incide directamente sobre la eficiencia de generación mostrada en la figura 58, donde se puede ver un incremento considerable del rendimiento de generación en función del avance de encendido, pasando de una eficiencia de 31% al 34,5%. Sin embargo, era de esperarse un aumento considerable de la temperatura de gases de escape, lo cual no se presentó ya que se mantuvo en el rango de 550°C a 600°.

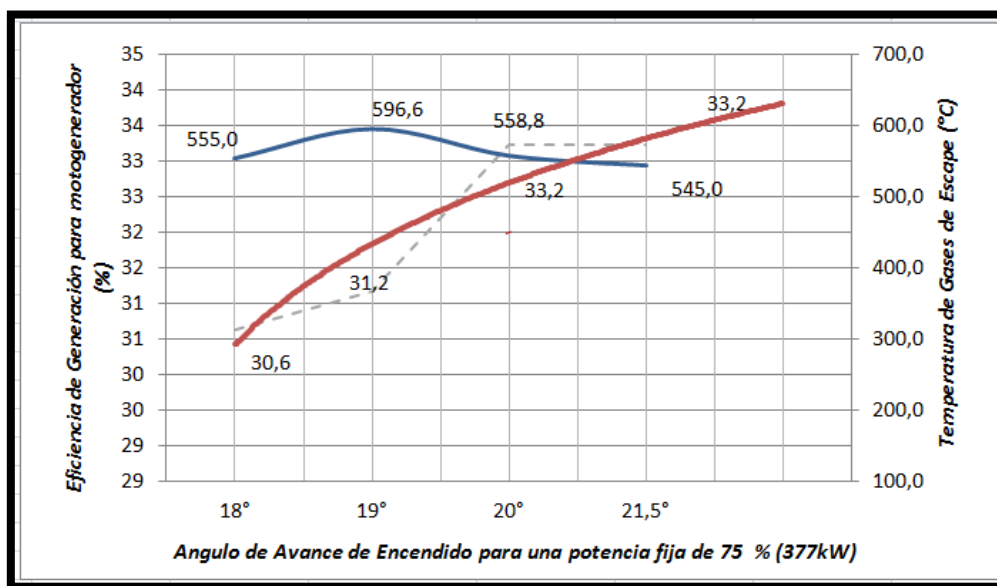


Figura 58: Impacto del Ajuste del Avance de encendido del motor Waukesha en la eficiencia de Generación y Temperatura v de Gases de Escape.
Fuente: Elaboración Propia.

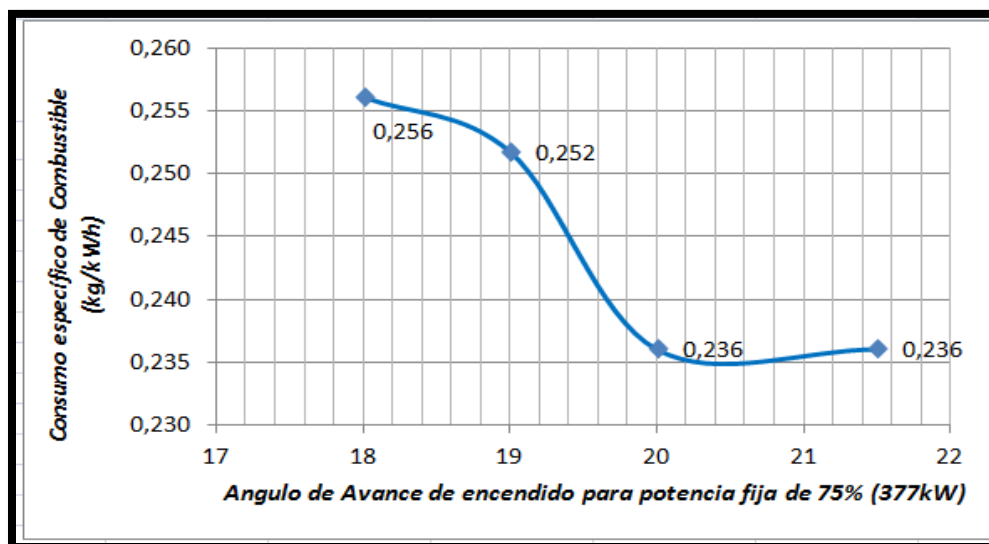


Figura 59 Consumo específico de combustible del motor Waukesha para carga fija de 75% ajustando avance de encendido.

Fuente: Elaboración Propia.

6.2.2 Ajuste de relación aire combustible de motor Waukesha

La relación aire-combustible (*Equivalente- λ*), se varía mediante el ajuste manual de la regulación del caudal de gas en el carburador para un flujo fijo de aire Figura 60.

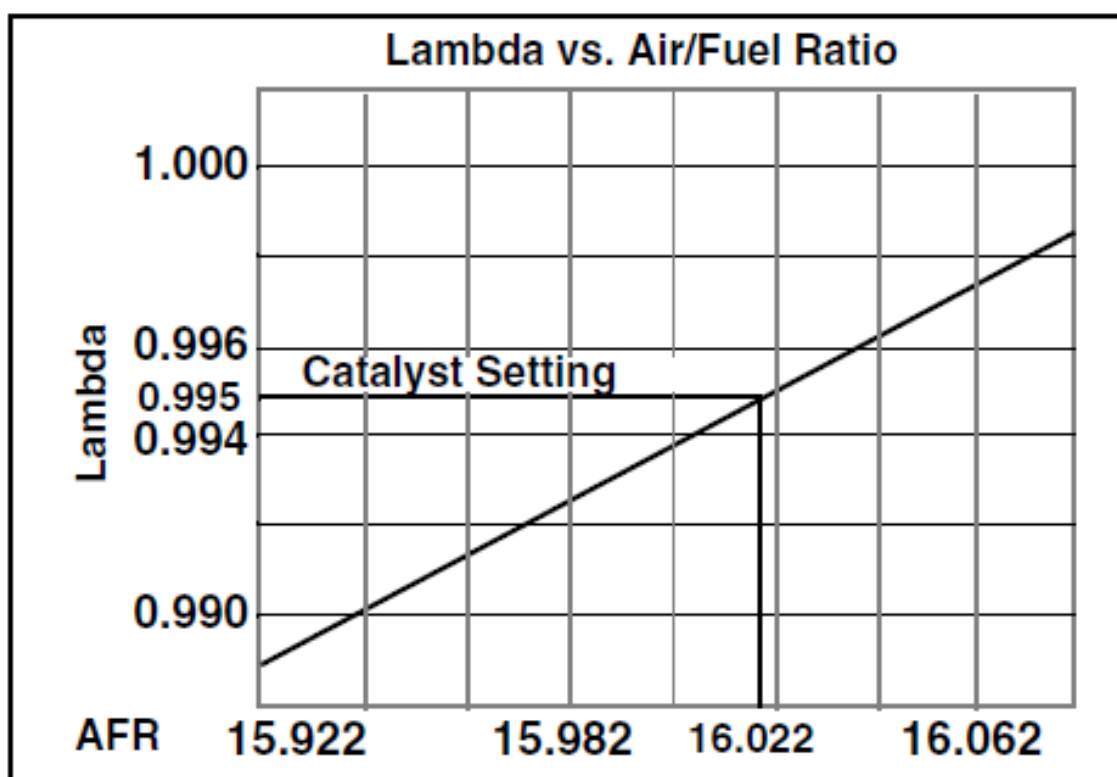


Figura 60: Tornillo de ajuste de flujo másico de combustible de gas en el carburador de motogenerador Waukesha.

Fuente: Ajuste de los sistemas de combustible VHP Waukesha.

Para la puesta a punto de motor a condiciones de gas natural, es girar completamente el tornillo del carburador (mezcla de potencia) en sentido horario, luego sacarlo con dos vueltas contrarias completas, una vez hecho esto se espera 30 segundos hasta que el analizador ajuste la mezcla completamente.

La *Figura 61* nos presenta el valor de la relación aire combustible para un motor Waukesha estequimétrico, se puede ver que el valor λ es de 0.995 para una mezcla estequimétrica y una relación Aire combustible de 16,022. La *Figura 62* nos presenta la curva de consumo de combustible para un motogenerador turbocargado GSI convencional Waukesha.



*Figura 61: Factor Lambda (λ) para motor estequiometrico Waukesha GSI.
Fuente: Ajuste de los sistemas de combustible VHP Waukesha.*

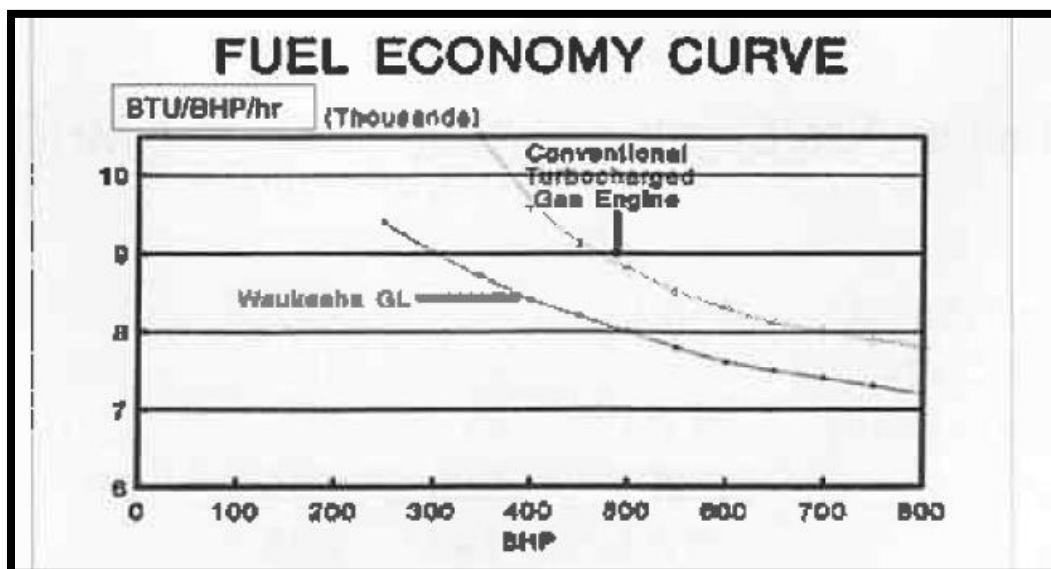
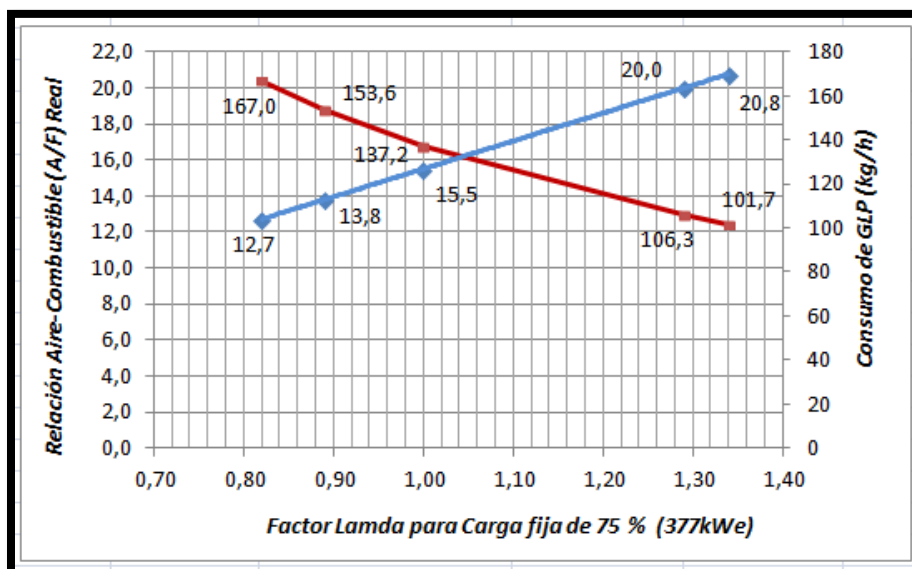


Figura 62: Curva de consumo de combustible de motor estequiometrico Waukesha GSI.
Fuente: Ajuste de los sistemas de combustible VHP Waukesha.

Para la gráfica anterior, el factor para convertir (BTU/BHP Hr) a (kJ/kWh), según el catalogo Waukesha es de 1,414.

Se realiza una variación del factor lambda, desde 0,8 hasta 1,34 para una carga eléctrica en el banco resistivo del 75% equivalente a 377 kWe. Para estas condiciones se observa que al empobrecer la mezcla (grafica roja), el consumo horario de combustible disminuye de 167kg/h a 106 kg/h. Esto se puede ver en el ajuste de la relación aire combustible (grafica azul), donde pasa de 12,7 a 20,8.



*Figura 63: Curva de consumo de combustible y relación aire-combustible de motor estequiométrico Waukesha GSI.
9Fuente: Elaboración Propia*

La relación aire combustible estequimétrica para el GLP se puede ver en el Anexo 1, donde se calcula mediante el balance molar por el método abreviado del GLP de alto butano basado en los datos cromatográficos de CORELAB.

Una mezcla pobre, incrementa la temperatura de los gases de escape, ya que facilita la aparición de NOx. El impacto del ajuste de la relación aire combustible se puede ver en la figura 64 donde para una variación de lambda de 0,8 a 1,34 se presenta un gran incremento en la temperatura, de 526° C a 596° C. *Figura 63.*

El consumo específico de combustible, se ve influenciado por el ajuste del lambda observándose que disminuye de 0,45 a 0,27 kg/kWh bajo un régimen fijo de carga del 75% de la nominal del motogenerador Waukesha.

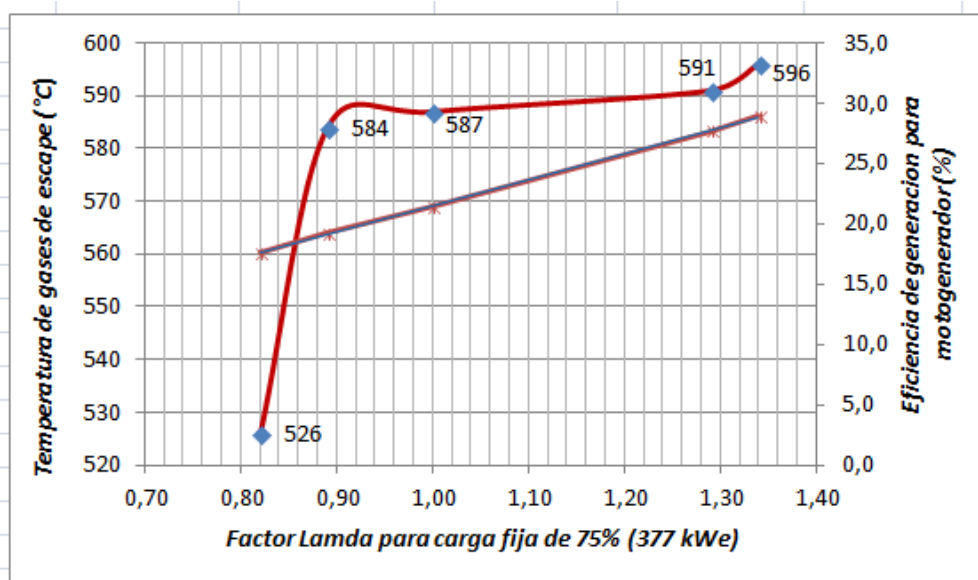


Figura 64: Curva de temperatura de gases de escape y eficiencia de ajustando relación A/F
Fuente: Elaboración Propia

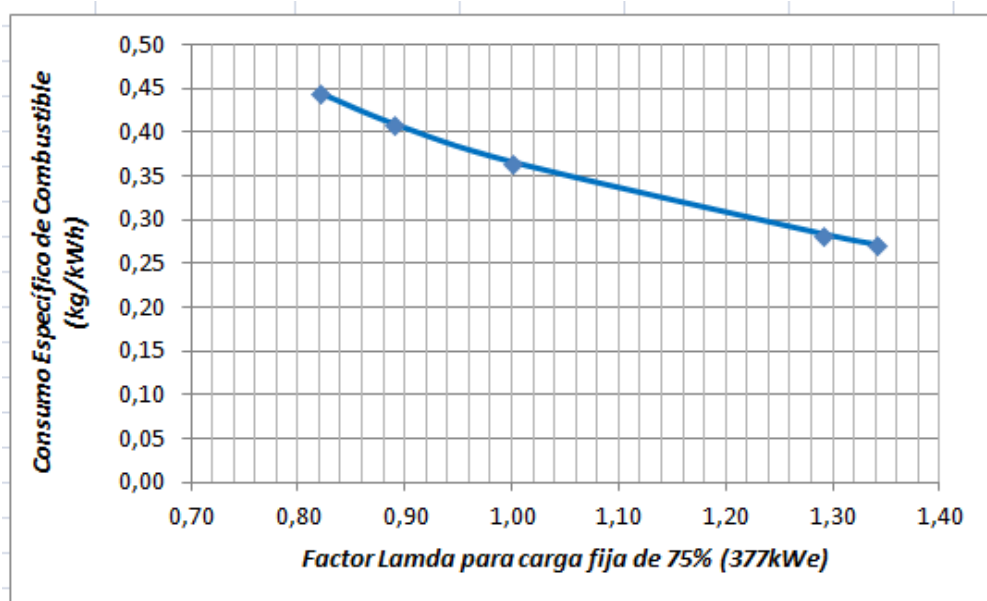


Figura 65: Curva de consumo específico de combustible con ajuste de relación aire combustible para motogenerador Waukesha.
Fuente: Elaboración Propia

7. Conclusiones

- Se realizó la prueba de un motogenerador utilizado en facilidades de campos petroleros con condiciones similares a las de Bogotá, utilizando como combustible el GLP suministrado por Campo de Cusiana, el cual posee un contenido de butano del 49,63% bajo reglajes de gas natural de 12° de avance y un A/F de 16.02.
- Se pudo establecer que en campos petroleros es posible utilizar GLP de alto butano para el suministro de energía eléctrica in situ mediante el uso motogeneradores Waukesha GSI, combustible que era desechado en mecheros locales del pozo; permitiéndose así el uso de 20500 barriles diarios de GLP como fuente alternativa de energía.
- Se estudió la distribución y el comportamiento energético de un Motogenerador Waukesha GSI utilizando GLP de alto butano. Obteniendo una eficiencia indicada del 64%, y una eficiencia eléctrica de en valores de 29 y el 31%. Se obtuvo las curvas de desempeño y emisiones en función de la carga generada.
- Mediante la variación del ángulo de avance de encendido como parámetro operativo ajustable fue posible reducir el consumo de GLP en 14,52 kg/h, para una carga fija en el motor de 75% equivalente a 377 kWe. Esto se traduce en un incremento en la eficiencia del 2.6% con una disminución en temperatura de gases de escape de 10° C.
- Al variar la relación aire-combustible para una carga fija en el generador se observó un aumento en la eficiencia de planta del 7.5% respecto a los reglajes de gas natural, aunque hubo un incremento de la temperatura de gases de escape de 9° C.
- Los reglajes óptimos para un Motogenerador Waukesha GSI de 500 kW, utilizando GLP de alto butano de Campo Cusiana trabajando a una carga fija de 75% son:
 - Ángulo de avance de encendido: 21,5°
 - Relación Aire Combustible: 20,8
 - Factor Lamda: 1,34

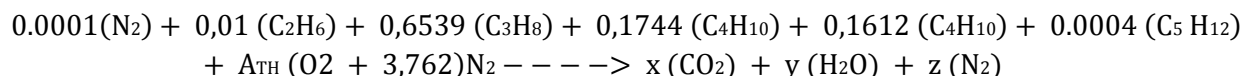
Con la aclaración de que se debe hacer un estudio de las emisiones, las cuales no se pudieron estudiar por fallas en el analizador de gases durante la prueba.

8. Recomendaciones

- Se deben realizar pruebas a larga duración, ya que por el protocolo que se diseñó, los tiempos de carga en régimen estacionario fueron muy cortos y los transitorios de potencia demasiado inmediatos secuencialmente.
- Se recomienda realizar pruebas bajo las condiciones de operación ajustables encontradas en esta investigación pero analizando las emisiones de gases de escape.
- Es conveniente correr el protocolo con GLP de alto butano en otros motogeneradores, ya que las condiciones encontradas son exclusivamente para el Motogenerador Waukesha F3521GSI.
- Los parámetros de operación encontrados fueron analizados para condiciones locales de la ciudad de Facatativa en los alrededores de Bogotá, es conveniente realizar pruebas a condiciones de ubicación de pozos petroleros donde se puede alcanzar mayores eficiencias.

9. Anexos

Balance Molar por Método Abreviado para Calculo de relación aire-combustible estequiometrica para GLP de alto butano



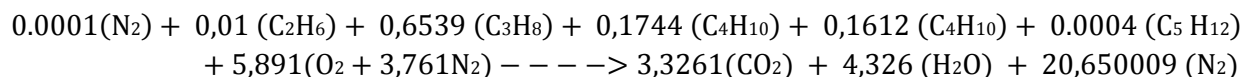
$$C = 0,01 \times 2 + 0,6539 \times 3 + 0,1744 \times 4 + 0,1612 \times 4 + 0,0004 \times 5 = X \\ X = 3,3261$$

$$H = (6 \times 0,01) + (8 \times 0,6539) + (10 \times 0,1744) + (10 \times 0,1612) + (12 \times 0,0004) = 2Y \\ Y = 4,326$$

$$N: 2 \times 0.0001 + 2 \times 3,762 \times 5,4891 = Z \times 2 \\ Z = 20,65009$$

$$O: 2A_{TH} = 3,3261 \times 2 + 4,326 \\ A_{TH} = 20,65009$$

Reacción estequiometrica completa



Relación Aire – Combustible estequiometrica en base molar de volumen y en masa.

$$\frac{\frac{A}{F} Mol_{Air}}{1 Mol_{Fuel}} = \frac{\frac{A}{F}}{\text{Esteq Molar}} = \frac{5,4891 \times \{1(Mol O_2) + 3,762(Mol N_2)\}}{1 Mol_{Fuel}}$$

$$\frac{\frac{A}{F}}{\text{Esteq Molar}} = 26,13909 \left(\frac{Mol_{Air}}{Mol_{Fuel}} \right)$$

$$\frac{\frac{A}{F}}{\text{Esteq Molar}} = 26,13909 \left(\frac{m^3_{Air}}{m^3_{Fuel}} \right)$$

$$\frac{\frac{A}{F}}{\text{Esteq Masa}} = \frac{5.4891 \times (2 \times 16\{kg O_2\} + 3,762 \times 14 \times 2)}{48,568\{kg Fuel\}} = 15.52156 \left(\frac{\{kg O_2\}}{\{kg Fuel\}} \right)$$

Calculo del real gross calorific value (HHV) mediante reacciones másicas y la tabla de la página 244 del libro de sarah Mcallister

$$HHV = \sum x_i \times HHV_i$$

$$HHV = 0,057765/100 \times (HHVN_2) + 0,617791/100 \times (HHVC_2H_6) + 59,2398/100 \times (HHVC_3H_8) + 20,826/100 \times (HHVC_4H_{10}) + 19,2505/100 \times (HHVC_4H_{10}) + 0,0592983/100 \times (HHVC_5H_{12})$$

*h*_h*v*

$$= \frac{0,057765(\theta) + 0,617791(51,902^9 + 59,2398(50,322) + 20,8269(49,363) + 19,2505(49,511) + 0,0592983(49,003))}{100} \left\{ \frac{MJ}{Kg} \right\}$$

$$HHV = 49,94379 \left\{ \frac{MJ}{Kg} \right\}$$

Según cromatografía

$$HHV_{\text{CROM}} = 2749 \left\{ \frac{BTU}{Ft^3} \right\}; P_{cs} = 2,0481 \left\{ \frac{kg}{m^3} \right\}$$

$$HHV_{\text{CROM}} = 2749 \left\{ \frac{BTU}{Ft^3} \right\} \times \frac{1}{2,0481} \left\{ \frac{m^3}{Kg} \right\} \times \left(\frac{1\{Ft\}}{0,3048\{m\}} \right)^3 \times \frac{1,05506}{1000} \left\{ \frac{MJ}{BTU} \right\}$$

$$HHV_{\text{CROM}} = 50,0097 \left\{ \frac{MJ}{Kg} \right\}$$

$$\%_{Dif} HHV = \frac{50,0097 - 49,94379}{50,0097} \times 100\% = 0,1318\%$$

A. Anexo: Ficha técnica motogenerador Waukesha

B. Anexo: Catálogo medidor de flujo Optiswirl 4070

C. Anexo: Certificados de calibración flujómetrosVortexOptiswirl 4070/C No D*3494**

D. Anexo : Certificado de calibración flujómetros VortexOptiswirl 4070/C No D*5847**

E. Anexo: Descripción Portable Gas3100P SyngasAnalyser

F. Anexo: Especificaciones técnicas Analizador Bacharach modelo 300

10. Bibliografía

- [1]. Asociación Colombiana del Petroleo. Sector minero y petrolero en Colombia. [En línea] 2010. [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <https://mail.google.com/mail/u/0/?shva=1#inbox/14295e2ef73ace4a>.
- [2]. Carbon footprints of heating oil and LPG heating systems. Johnson, Eric P. 2012, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 35, págs. 11-22.
- [3]. Speight, James G. Handbook of Petroleum Product Analysis. John Wiley & Sons, Inc : s.n., 2002. pág. 58. ISBN: 0-471-20346-7.
- [4]. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas). Masi, Massimo. 2012, Energy, Vol. 41, págs. 252 - 260.
- [5]. Perry, Robert H y Green, Don W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. New York : McGraw-Hill, 1999. pág. Tabla 1.5. ISBN: 0-07-049841-5.
- [6]. ISO 15970:2008. Natural Gas - Measurement of properties . 2008.
- [7]. Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark ignition engine. Gumus, M. 2011, Fuel Processing Technology, Vol. 92, págs. 1862 - 1867.
- [8]. Effect of n-Butane and propane on performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME-blended LPG fuel. Lee, Seokhwan, y otros, y otros. 2011, Fuel, Vol. 90, págs. 1674 - 1680.
- [9]. Performance of single cylinder spark ignition engine fueled by LPG. Saulaiman, M. Y., Ayob, M. R. y Meran, I. 2013, Precedia Engineering, Vol. 53, págs. 579 - 585.
- [10]. Parsons Brinckerhoff PB. Thermal Power Station Advice - Reciprocating Engines Study. Report for the Electricity Commission. [En línea] Noviembre de 2009. [Citado el: 5 de Diciembre de 2013.] <https://www.ea.govt.nz/dmsdocument/963>. [Reporte final].
- [11]. Petchers, Neil. Combined Heating, Cooling & Power Handbook: Technologies & Applications- an integrated Approach to Energy Resporce Optimization. s.l. : The Fairmont Press, Inc., 2002. pág. PP. 877. ISBN 0-88713-349-0.
- [12] Herrera, Beatriz. UPME. Unidad de Planeación Minero Energética. Las Cadenas del Gas Licuado de Petróleo en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. 2005
- [13] Aponte, Juan. UPME. Unidad de Planeación Minero Energética. Proyección de Demanda Energética en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. 2013.

-
- [14] Becco, Lorenzo. Los Gases Licuados del Petróleo. Repsol. Graficas Ennar. Madrid España. 1999.
- [15] Masi, Massimo. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas). 2012, Energy.
- [16] Ecopetrol, Nuevo hito en el mejoramiento de la calidad del aire en el país. Boletines 2012. <http://www.ecopetrol.com.co/>
- [17] Icontec estandar. icontec ntc 2016.
- [18] Icontec estandar. icontec ntc 1930.
- [19] Go power systems. Principles of Engine Analysis. U. S. A. Go power & Briggs Stratton.
- [20] Lister - tecquipment. Engine test equipment & instrumentation, Manual de referencia pruebas y análisis.
- [21] Arango, Jorge Eduardo. Pruebas de motores de combustión interna en el laboratorio de motores. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2004.
- [22] Jovaj, m. s. maslov, g. s. Motores de Automóvil. Editorial MIR Moscú. 1973.
- [23] Eastop, td. Mcconkey, A. Applied thermodynamics for engineering technologist. Ed.Longman Scientific y Technical. Fifth edition. 1993.
- [24] Obert. f. Edward. Motores de combustión interna. Ed CECSA. Mexico, 1987.
- [25] Ariaz-paz. m. Manual del automóvil. España. 52Ed. CIE. 1997
- [26] Alonso, j. m. Técnicas del Automóvil: Inyección de gasolina y dispositivos
- [27] Organization Of The United Nations, Status of Ratifications. Last modified on: 14 January 2009.
- [28] Kyoto Protocol. Cambio Climático Situación Actual y Perspectivas. WWF/adena. Gran Vía de San Francisco, 8-D. 28005 Madrid. España. 2008.
- [29] Fao. Manual de Biogás. Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables Chile. 2011.
- [30] Souza, Rodrigo. Performance of a motogenerator adapted for biogas. Cienc. agrotec., Lavras, v. 34, n. 1, p. 190-195, jan./fev. Brasil. 2010.
- [31] Kyoto Protocol, Status of Ratificación, Organización de las Naciones Unidas. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (14 de enero de 2009).

- [32], Fabio E. Sierra. Tecnologías para el Aprovechamiento de los Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2008.
- [33] Mantilla Jorge, Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible. Universidad Nacional de Colombia. Redalyc. 2008
- [34] Kamia Nagar, Handbook on biogas and its Applications. National Institute of Industrial Research. New Delhi, (India). 2007.
- [35] Mitzlaff K. and M.H. Mkumbwa Use of Biogas as an Alternative Fuel in Stationary Diesel Engines. University of Dar-es-Salaam, Tanzania, 1985
- [36] Bernate, Hugo. Protocolo para desarrollar pruebas comparativas en el desempeño de motores de ignición por compresión y emisiones contaminantes usando diferentes combustibles. Universidad Nacional de Colombia. 2008.
- [37] Obert, Edward, Motores de combustión Interna Alternativos, Universidad de Wisconsin , Mxico, 1992.
- [38] Payri, Deantes. Motores de Combustión Interna Alternativos, Universidad Politecnica de Valencia, España, Valencia, 2011.
- [39] Colome, José. Grupos Electrónicos, Publicaciones Marcombo, Barcelona, España, 1987.
- [40] Silva, Vladimir. Analisis Exploratorio de Investigaciones sobre los Motores de Combustión Interna que Funcionan con Biogas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia 2012.
- [41] Arango, Jorge. Tecnologías y Aprovechamiento de los Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. 2008.
- [42] Cubillos, Daniel. Estudios de los parámetros técnicos para el suministro de GNV en motores de combustión interna con inyección electrónica de combustible para condiciones de Santa fe de Bogota. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. 2000.
- [43]. Acevedo, Carlos. Estudio sobre la Influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia, Universidad de Antioquia. Medellín. 2003.

