

ANÁLISIS DE LA POTENCIA GENERADA Y DE LOS GASES DE ESCAPE DE  
UN GRUPO ELECTRÓGENO USANDO COMO COMBUSTIBLE UNA MEZCLA  
DE GASOLINA-BIOGÁS

FERNEY ORLANDO GUTIERREZ TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2019

ANÁLISIS DE LA POTENCIA GENERADA Y DE LOS GASES DE ESCAPE DE  
UN GRUPO ELECTRÓGENO USANDO COMO COMBUSTIBLE UNA MEZCLA  
DE GASOLINA-BIOGÁS

FERNEY ORLANDO GUTIERREZ TORRES

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

JORGE LUS CHACON VELASCO

Ph.D. en Ingeniería Mecánica

Codirector:

FRANKLIN JULIAN PATIÑO MOLINA

Ing. Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2019

## **Dedicatorio**

Esta investigación va dedicada a todas las personas que apoyaron a la realización y culminación de este proyecto en especial a mi madre Claudia Velandia y mi hermano Víctor Gutiérrez.

## **Agradecimientos**

El autor agradece a la Universidad Industrial de Santander, al grupo de Investigación GIEMA y a las personas del sector rural que apoyaron e impulsaron la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

|                                                                                                                                        | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                                                                                                              | 16   |
| <b>1. OBJETIVOS</b> .....                                                                                                              | 18   |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....                                                                                                             | 18   |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                                        | 18   |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....                                                                                                          | 19   |
| 2.1 ESTADO DEL ARTE .....                                                                                                              | 19   |
| 2.2 ANÁLISIS TERMOQUÍMICO DE LA COMBUSTIÓN .....                                                                                       | 21   |
| 2.2.1 Combustible. ....                                                                                                                | 22   |
| 2.2.2 Gasolina. ....                                                                                                                   | 22   |
| 2.2.3 Biogás. ....                                                                                                                     | 23   |
| 2.3 COMBUSTIÓN REAL .....                                                                                                              | 24   |
| 2.4 GRUPO ELECTRÓGENO .....                                                                                                            | 24   |
| 2.4.1 Funcionamiento con carga reducida de un grupo electrógeno. ....                                                                  | 24   |
| <b>3. PROTOCOLO DE PRUEBAS</b> .....                                                                                                   | 26   |
| 3.1 PROTOCOLO PARA REALIZAR UNA REVISIÓN A GRUPOS<br>ELECTRÓGENOS DE BAJA POTENCIA (MENORES A 3 KW) .....                              | 26   |
| 3.1.1 Condiciones ambientales para realizar las pruebas según la norma NTC<br>4983 .....                                               | 26   |
| 3.1.2 Recomendaciones para las pruebas .....                                                                                           | 26   |
| 3.1.3 Procedimiento de verificación y operación. ....                                                                                  | 27   |
| 3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....                                                                                                       | 29   |
| 3.2.1 Primera fase. ....                                                                                                               | 29   |
| 3.2.2 Segunda fase: Evaluación del comportamiento del grupo electrógeno<br>con mezclas y selección de los niveles de sustitución ..... | 30   |
| 3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL .....                                                                                                         | 30   |
| 3.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....                                                                                              | 32   |
| 3.5 MODIFICACIONES .....                                                                                                               | 33   |

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.1 Configuración al flujo de gasolina.....                                        | 33        |
| 3.5.2 Configuración al flujo de biogás. ....                                         | 34        |
| 3.6 SITIO DE PRUEBAS .....                                                           | 35        |
| <b>4.    ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS COMBUSTIBLES .....</b>                              | <b>37</b> |
| 4.1 ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN .....                                  | 37        |
| 4.1.1 Balance de especies .....                                                      | 38        |
| 4.1.2 Parámetros de combustión.....                                                  | 38        |
| 4.2 COMBUSTIÓN TEÓRICA DE GASOLINA .....                                             | 39        |
| 4.2.1 Parámetros de combustión de gasolina .....                                     | 40        |
| 4.3 COMBUSTIÓN TEÓRICA DEL BIOGÁS.....                                               | 41        |
| 4.3.1 Parámetros de combustión de biogás .....                                       | 42        |
| <b>5.    ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS.....</b>                                            | <b>44</b> |
| 5.1 CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y POTENCIA GENERADA.....                                  | 44        |
| 5.1.1 Consumo específico de gasolina y biogás .....                                  | 44        |
| 5.1.2 Consumo de combustible y potencia generada de las mezclas gasolina-biogás..... | 47        |
| 5.2 EFICIENCIA TOTAL .....                                                           | 51        |
| 5.3 TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE.....                                          | 53        |
| 5.4 EMISIONES DE ESCAPE .....                                                        | 54        |
| 5.4.1 Monóxido de Carbono (CO) .....                                                 | 56        |
| 5.4.3 Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ). ....                                    | 57        |
| 5.4.3 Hidrocarburos no quemados (HC).....                                            | 58        |
| <b>6.    VIABILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICA .....</b>                                    | <b>60</b> |
| 6.1 COSTO DE LOS COMBUSTIBLES.....                                                   | 61        |
| 6.1.2 Costo de la gasolina. ....                                                     | 61        |
| 6.1.3 Costo del biogás.....                                                          | 61        |
| 6.2 IMPLMETOS PARA PRODUCIR ENERGÍA .....                                            | 63        |
| 6.3 COSTO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA (KW) .....                                        | 64        |
| 6.4 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES.....                                                   | 66        |
| 6.4.1 Emisiones de CO. ....                                                          | 68        |
| 6.4.2 Emisiones de CO <sub>2</sub> .....                                             | 69        |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 6.4.3 Emisiones de HC..... | 69        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>71</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>73</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Esquema y componentes del montaje de experimentos.....            | 31 |
| <b>Figura 2.</b> Montaje general de los equipos .....                              | 32 |
| <b>Figura 3.</b> Formato de las pruebas .....                                      | 32 |
| <b>Figura 4.</b> Chicleres y brocas milimétricas.....                              | 34 |
| <b>Figura 5.</b> Mezclador de biogás .....                                         | 35 |
| <b>Figura 6.</b> Esquema del mezclador de biogás. ....                             | 35 |
| <b>Figura 7.</b> Digestor en el sitio de pruebas.....                              | 36 |
| <b>Figura 8.</b> Composición de los gases de escape de motores de ciclo Otto ..... | 37 |



## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Propiedades de la gasolina .....                                                                      | 22 |
| <b>Tabla 2.</b> Procedimiento de verificación.....                                                                    | 27 |
| <b>Tabla 3.</b> Niveles de carga en las pruebas .....                                                                 | 30 |
| <b>Tabla 4.</b> Dimensiones del chicler para cada mezcla.....                                                         | 34 |
| <b>Tabla 5.</b> Composición de los humos húmedos de la gasolina .....                                                 | 40 |
| <b>Tabla 6.</b> Composición de los humos secos de la gasolina .....                                                   | 40 |
| <b>Tabla 7.</b> Composición de los humos húmedos del biogás.....                                                      | 42 |
| <b>Tabla 8.</b> Composición de los humos secos del biogás .....                                                       | 42 |
| <b>Tabla 9.</b> Consumo de combustible, potencia entregada y consumo específico de energía de gasolina y biogás. .... | 45 |
| <b>Tabla 10.</b> Consumo de combustible y potencia entregada de las mezclas. ....                                     | 47 |
| <b>Tabla 11.</b> Emisiones generadas de la combustión de la gasolina .....                                            | 54 |
| <b>Tabla 12.</b> Emisiones generadas de la combustión del biogás.....                                                 | 54 |
| <b>Tabla 13.</b> Emisiones generadas de la combustión de la mezcla I .....                                            | 55 |
| <b>Tabla 14.</b> Emisiones generadas de la combustión de la mezcla II .....                                           | 55 |
| <b>Tabla 15.</b> Emisiones generadas de la combustión de la mezcla III .....                                          | 55 |
| <b>Tabla 16.</b> Matriz de relación beneficio-impacto .....                                                           | 61 |
| <b>Tabla 17.</b> Producción promedio de estiércol de acuerdo con el tiempo de estación .....                          | 62 |
| <b>Tabla 18.</b> Costos de instalación del biogás .....                                                               | 63 |
| <b>Tabla 19.</b> Costos de los implementos de las pruebas .....                                                       | 64 |
| <b>Tabla 20.</b> Costos de producir energía con cada combustible .....                                                | 65 |
| <b>Tabla 21.</b> Emisiones de CO, CO <sub>2</sub> y HC en g/h para tres rangos de potencia.....                       | 67 |

## LISTA DE GRÁFICAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gráfica 1.</b> Consumo específico de energía vs Potencia generada de la gasolina y el biogás. ....           | 46 |
| <b>Gráfica 2.</b> Consumo específico de energía vs Potencia generada para la mezcla I .....                     | 49 |
| <b>Gráfica 3.</b> Consumo específico de energía vs Potencia generada para la mezcla II .....                    | 50 |
| <b>Gráfica 4.</b> Consumo específico de energía vs Potencia Generada para la mezcla III .....                   | 50 |
| <b>Gráfica 5.</b> Eficiencia vs Potencia generada.....                                                          | 51 |
| <b>Gráfica 6.</b> Temperatura de los gases de escape vs Potencia generada .....                                 | 53 |
| <b>Gráfica 7.</b> Monóxido de Carbono (%V) vs Potencia generada.....                                            | 56 |
| <b>Gráfica 8.</b> Dióxido de Carbono (%V) vs Potencia generada .....                                            | 57 |
| <b>Gráfica 9.</b> Hidrocarburos no quemados (ppm) vs Potencia generada.....                                     | 58 |
| <b>Gráfica 10.</b> Costos de producir energía con cada mezcla.....                                              | 65 |
| <b>Gráfica 11.</b> Emisiones de CO, CO <sub>2</sub> y HC en g/h vs la potencia generada (1,7-1,85 y 2 KW) ..... | 68 |

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

**ANEXO A.** Análisis De Cromatografía Al Biogás

**ANEXO B.** Equipos y dispositivos del montaje experimental

**ANEXO C.** Formato de la prueba de gasolina

**ANEXO D.** Formato generado del software OMNIBUS 800

## RESUMEN

**TITULO:** ANÁLISIS DE LA POTENCIA GENERADA Y DE LOS GASES DE ESCAPE DE UN GRUPO ELECTRÓGENO USANDO COMO COMBUSTIBLE UNA MEZCLA DE GASOLINA-BIOGÁS\*

**AUTOR:** FERNEY ORLANDO GUTIERREZ TORRES\*\*

**PALABRAS CLAVE:** BIOGÁS, GENERADOR, POTENCIA ELÉCTRICA, EMISIONES CONTAMINANTES.

### DESCRIPCIÓN:

Una fuente importante de generación de gases de efecto invernadero es la combustión y quema de hidrocarburos. Estos son utilizados de manera convencional como combustible en maquinaria industrial y en motores de combustión interna. Por esta razón, es importante evaluar el uso de combustibles alternativos para disminuir el impacto ambiental que esto genera.

Se realizaron pruebas experimentales con un grupo electrógeno de encendido por chispa. El objetivo fue realizar un análisis comparativo de los principales parámetros de operación (potencia generada, consumo de combustible y emisiones), utilizando como combustible gasolina, biogás, y la mezcla de estos combustibles en tres diferentes proporciones a condiciones ambientales. Los resultados obtenidos mostraron que la potencia generada al mezclar gasolina y biogás es similar al caso en que se utiliza como combustible solamente gasolina. Se observó una disminución del 73,6% en la concentración de Monóxido de Carbono (CO) y un 71,2% de Hidrocarburos no Quemados (HC). Lo anterior es un hallazgo importante que contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero como Metano (CH<sub>4</sub>) y CO.

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

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Phd. Jorge Luis Chacon Velasco. Codirector: Ing. Franklin Julian Patiño Molina.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** ANALYSIS OF THE POWER GENERATED AND THE EXHAUST GASES OF AN ELECTRONIC GROUP USING A GASOLINE-BIOGAS MIXTURE AS A FUEL

**AUTHOR:** FERNEY ORLANDO GUTIERREZ TORRES

**KEYWORDS:** BIOGAS, GENERATOR, ELECTRICAL POWER, POLLUTANT EMISSIONS.

### **DESCRIPCIÓN:**

An important source of greenhouse gas generation is the combustion and burning of hydrocarbons, These are used conventionally as fuel in industrial machinery and gasolina combustion gasolina, For this reason, it is important to evaluate the use of alternative fuels to reduce the environmental impact that this generates

Experimental test were done with a Spark Ignition Engine (SIE) generator set, The aim was to carry out a comparative gasolina of the main operating parameters (power generated, fuel consumption and emissions), using as fuel gasolina, biogas, and the mixture of these two in different proportions in environmental conditions, The results obtained showed that the power generated using a mixture of gasolina and biogas is similar to the power generated using gasolina as fuel, A decrease of 73,6% in the concentration of Carbon Monoxide (CO) and 71,2% of Unburned Hydrocarbons (HC) was observed, The above is an important finding that contribute to the reduction of emissions of greenhouse gases such as methane and CO.

The combustion process is improved reaching an efficiency of 16,5%, and the reduction of greenhouse gases is significant with respect to using gasolina, generating a great social and environmental impact without making major modifications to the equipment that uses fossil fuels.

## INTRODUCCIÓN

Esta tesis contribuye al desarrollo del proyecto ADAPTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y LAS MEDICIONES DE UN GENERADOR ELECTRÓNICO UTILIZANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE del estudiante de Maestría Franklin Julián Patiño Molina de la Universidad Industrial de Santander el cual forma parte de un proyecto de investigación financiado por la VIE.

La energía eléctrica y mecánica son de vital importancia para la economía de cualquier país, y aun cuando se trabaja en mejorar la eficiencia energética y se invierte en el desarrollo de nuevas tecnologías, el petróleo, el carbón y el gas natural siguen siendo las fuentes de combustibles esenciales, aunque la extracción y uso de estos hidrocarburos genere problemas ambientales.

Los gases de efecto invernadero son generados por la combustión, quema de hidrocarburos y desechos orgánicos, los cuales se utilizan en procesos industriales y en mayor parte por el uso de Motores de Combustión Interna (MCI) <sup>1</sup>. Por esta razón, es importante evaluar el uso de nuevos tipos de combustibles para disminuir dicho impacto ambiental.

Una alternativa que tiene grandes ventajas es el biocombustible que se obtiene del aprovechamiento de materia orgánica, la cual genera un gas rico en metano ( $\text{CH}_4$ ) mediante un proceso anaeróbico, para el cual no se requiere invertir gran cantidad de dinero en materia prima, instalaciones y energía para producirlo.

Con este proyecto no se busca reemplazar los combustibles actuales por el biogás, debido a que este no cuenta con el suficiente poder calorífico para hacerlo, y tiene

---

<sup>1</sup> B. B. Henry and L. Gloria, *Información técnica sobre los gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2007.

su gran desventaja en que tiene poca densidad energética a comparación de los hidrocarburos.

La importancia de esta investigación es realizar un estudio de las mezclas Gasolina-Biogás, en generadores de hasta 3 KW debido a que disminuye la dependencia de los hidrocarburos, y utiliza energía renovable como una opción real de seguridad energética para las zonas rurales de Colombia. Además, existe la necesidad de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos disponibles como son los residuos orgánicos, los cuales pueden ser usados como medio para producir energía eléctrica o mecánica.

Un efecto positivo del tratamiento anaeróbico sobre los desechos orgánicos es evitar la emisión del metano, que es uno de los gases con mayor efecto invernadero. La digestión anaeróbica disminuye la emisión de olores desagradables en criaderos de animales. Se destaca que en nuestro país solo se utiliza el 1,13% de energía proveniente de biomasa, dentro de la matriz energética nacional <sup>2</sup>.

Un aspecto que se considera fundamental es fomentar la conciencia de la ciudadanía por el futuro energético de Colombia, el cuidado y la preservación del medio ambiente, mediante la disminución de gases nocivos para los seres vivos.

---

<sup>2</sup> B. G. Kevin, "La oferta hidráulica equivale a cerca de 69% de la matriz energética del país," *La Republica - Minas y Energía*. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/minas-y-energia-marzo-2019/la-oferta-hidraulica-equivale-a-cerca-de-69-de-la-matriz-energetica-del-pais-2842181>. [Accessed: 20-Mar-2019].

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el análisis de la potencia generada y de los gases de escape de un grupo electrógeno usando como combustible una mezcla de gasolina-biogás, contribuyendo con la misión de la escuela de ingeniería mecánica en el desarrollo social en zonas rurales, con tecnologías que permitan la flexibilidad de producir energía eléctrica y mecánica con diferentes combustibles.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un protocolo de pruebas e implementarlo para determinar el comportamiento del grupo electrógeno utilizando diferentes concentraciones de Gasolina/Biogás como combustible.
- Estudiar el comportamiento del grupo electrógeno trabajando solamente con gasolina y luego con biogás, teniendo en cuenta el consumo de combustible, potencia generada y observar el porcentaje de los gases de escape (hidrocarburo (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>)).
- Realizar un análisis teórico del comportamiento de la combustión, potencia y gases de escape utilizando como combustible gasolina y/o biogás.
- Estudiar el comportamiento del grupo electrógeno trabajando con tres diferentes concentraciones del combustible gasolina-biogás, teniendo en cuenta el consumo de combustible, potencia generada y observar el porcentaje de los gases de escape (hidrocarburo (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>)).
- Determinar la viabilidad técnico-económica para la utilización de un combustible gasolina-biogás.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

Hacia 1921, en Birmingham (Inglaterra) se instaló el primer motor para utilizar el gas de lodos de 25 HP. Y tuvo tanto éxito que en 1927 se instaló un motor de 150 HP, otro en 1928 y dos motores más de 400 HP en 1930, en la misma ciudad <sup>3</sup>.

Las mezclas de combustibles derivados del petróleo con aquellos derivados de fuentes alternativas de energía, como el etanol, han sido un problema de interés desde los años 70, cuando se presentó la gran crisis en el suministro de petróleo debido al embargo instaurado por la Organización de Países Exportadores de Petróleo <sup>4</sup>.

En Colombia el proceso de cambio hacia mezclas de gasolina y etanol inició con base en el modelo brasileiro. Es así cómo se emite la ley 693, aprobada en Colombia en el año 2001, sobre el uso de combustibles oxigenados, la cual obliga a todos los usuarios a utilizar, a partir del mes de septiembre de 2005, una mezcla de gasolina con alcohol etílico anhidro (etanol) en proporción en volumen de este último de  $10 \pm 0,5\%$  <sup>5</sup>.

Se destaca que en Colombia existe un gran interés en esta tecnología, debido a que es una alternativa adecuada para suministrar energía eléctrica en regiones apartadas o de difícil acceso para la red convencional [6]. Igualmente existe un gran interés en optimizar el funcionamiento de los MCI, con el fin de reducir su impacto

---

<sup>3</sup> G. Samuel and C. R. Velzy, "Operation of Sludge Gas Engines," *Fed. Sew. Work. Assoc.*, 1963, vol. 8, # 3, pp. 57–63.

<sup>4</sup> B. Simone and M. Nadia, "Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability," *Biomass and Bioenergy*, 1996, vol. 11 No °5, pp. 411–418.

<sup>5</sup> Congreso de Colombia, *Ley 693 de septiembre 19 de 2001*. Colombia: Departamento Administrativo de la Función Pública.

medioambiental, y para ello se estudia la incorporación de combustibles alternativos como el gas producido a partir de biomasa <sup>6 7 8</sup>.

Se han desarrollado estudios muy completos sobre los efectos del uso de biogás en el rendimiento y emisiones del motor de encendido por chispa, considerando los principales aspectos como son la concentración de metano, y CO<sub>2</sub> <sup>9 10</sup>, Pero solo trabajando el motor de combustión interna con este combustible, de estos estudios se destaca la pérdida de potencia producidas respecto a la gasolina, y los problemas para que el motor arranque con este combustible, variabilidad en la concentración del biogás debido a la materia prima para obtenerlo. Y la instalación de complejos sistemas mezcladores biogás-aire y de dispositivos para el control de la ignición gobernados por avanzados algoritmos de control <sup>11 12</sup>, todos estos adicionales pueden ser más costosos que el mismo motor, siendo esto una clara desventaja para su implementación a pequeña escala.

En el contexto nacional se han realizado varios trabajos en la implementación de motores a funcionamiento dual, algunos de los que aparecen documentados están

---

<sup>6</sup> R. Sandra, L. Carlos, and P. Juan, "Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: un análisis técnico - económico e implicaciones por reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 2012, vol. N.º 62, pp. 157–169.

<sup>7</sup> B. Iván, C. Andres, and P. Francisco, "Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diesel-biogás para generación de electricidad," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 2007, vol. N.º 42, pp. 79–93.

<sup>8</sup> G. S. Gabriel, C. V. Jorge Luis, C. G. Arlex, and L. G. Andrés, "Estudio analítico y experimental del desempeño de motores diesel alimentados con Bio-Oil hidrotratado," *Rev. UIS Ing.*, 2018, vol. 17 No.º 2, pp. 115–126,

<sup>9</sup> R. J. Crookes, "Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines," *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 30 No.º 5, pp. 461–468.

<sup>10</sup> E. Porpatham, A. Ramesh, and B. Nagalingam, "Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine," *Fuel*, 2008, vol. 87, pp. 1651–1659.

<sup>11</sup> Y. Ando, K. Yoshikawa, M. Beck, and H. Endo, "Research and development of a low-BTU gas-driven engine for waste gasification and power generation," *Energy*, 2005, vol. 30, pp. 2206–2218.

<sup>12</sup> Y. Yudai, M. Kanno, S. Yoshitaka, and K. Shigehiko, "Development of an engine control system using city gas and biogas fuel mixture," *Appl. Energy*, 2013, vol. 101, pp. 465–474.

enfocados a la viabilidad técnica de emplear el biogás como combustible primario en Motores de Encendido por Compresión (MEC) <sup>13 14</sup>.

No se han encontrado estudios sobre el comportamiento de los parámetros efectivos e indicados de motores duales a biogás y la caracterización del proceso de combustión que en ellos se da. Se hace necesario establecer una metodología de evaluación, para la adaptación a biogás, la cual debería ser sencilla y de bajo costo, como los trabajos realizados por Surata y Reddy, estos autores ejemplifican la viabilidad del uso del biogás como combustible alternativo en el trabajo de motores y moto-generadores, utilizando sistemas comerciales diseñados para Gas Licuado de Petróleo (GLP) y Gas Natural (NG), adaptados al biogás, pero que en contraste con los sistemas propuestos por Ando y Yamasaki, carecen de control en la relación aire-combustible <sup>15 16</sup>.

## 2.2 ANÁLISIS TERMOQUÍMICO DE LA COMBUSTIÓN

Durante cualquier proceso de combustión, la energía química del combustible es liberada en forma térmica y ocurre transferencia de calor. El cambio químico tiene que ocurrir antes de que esa energía sea liberada y utilizada (los combustibles tienen que arder en presencia de oxígeno), estas reacciones ayudan a elevar la temperatura de algún producto o ejecuta trabajo expandiendo los productos gaseosos (en los cilindros de los motores), y una cierta cantidad de la energía producida se disipa al ambiente o aparece en los productos del proceso (humos, cenizas).

---

<sup>13</sup> C. PHILIPPE, "El aprovechamiento del biogas de las lagunas de palma. perfil del proyecto Palmeiras en Tumaco, Colombia.," *Rev. Palmas*, 1999, vol. 21, pp. 237–240.

<sup>14</sup> H. CÁRDENAS, "Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna," *Rev. Energética*, 1995, vol.13, pp 53-57.

<sup>15</sup> K. S. Reddy, S. Aravindhan, and T. K. Mallick, "Investigation of performance and emission characteristics of a biogas fuelled electric generator integrated with solar concentrated photovoltaic system," *Renew. Energy*, 2016, vol. 92, pp. 233–243.

<sup>16</sup> S. Wayan, N. Tjokorda, A. Ketut, and N. Dewa, "Simple conversion method from gasoline to biogas fueled small engine to powered electric generator," *Energy Procedia*, 2014, vol. 52, pp. 626–632.

**2.2.1 Combustible.** Un combustible es una sustancia capaz de reaccionar con el oxígeno del aire con desprendimiento de energía térmica apta para producir trabajo mecánico. La mayoría de los combustibles utilizados en la actualidad pueden clasificarse dentro de una de estas tres categorías: sólidos (carbón), hidrocarburos líquidos (la gasolina) o hidrocarburos gaseosos (gas natural, propano, entre otros). Existen varias propiedades que caracterizan a los combustibles, dependiendo de su composición fisicoquímica. Una de las más importantes para el proceso de combustión es el poder calorífico (cantidad que representa el calor desprendido debido a la combustión completa del combustible por unidad de masa (o volumen)).

**2.2.2 Gasolina.** La gasolina es obtenida del petróleo por destilación fraccionada, y se utiliza principalmente como combustible en MCI. El combustible utilizado para las pruebas fue el que en Colombia se distribuye como gasolina corriente E10, la cual nos indica que un 10% en volumen del combustible entregado al consumidor contiene etanol.

Para la realización de los cálculos y obtención de resultados se tuvieron en cuenta los valores resumidos en la tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades de la gasolina

| PROPIEDAD                | REPRESENTACIÓN           | VALOR                  |
|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Formula química          | FORMULA                  | $C_7H_{17}$            |
| Volumen específico       | $v_o$ ( $m^3/kg$ )       | $1,449 \times 10^{-3}$ |
| Masa molecular           | $M_r$ ( $kg/kmol$ )      | 101,213                |
| Entalpia de formación    | $h^\circ_f$ ( $kJ/mol$ ) | -267,12                |
| Entalpia de vaporización | $h_{fg}$ ( $kJ/mol$ )    | 38,51                  |
| Radio estequiométrico    | $a_s$                    | 11,25                  |
| Poder calorífico         | $Q_{HV}$ (BTU/Galón)     | 115400 <sup>17</sup>   |

Fuente:<sup>18</sup>

<sup>17</sup> ACIEM, "Canasta Energética," *Gas y Energía*, 2019. [Online]. Available: <http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>. [Accessed: 20-May-2019].

<sup>18</sup> F. Colin and K. Allan, *Introduction to Internal Combustion Engines*. United Kingdom: WILEY, 2015.

La gasolina utilizada en este estudio se obtuvo de una estación de servicio convencional de la empresa Exxon Mobil™.

**2.2.3 Biogás.** El biogás se compone de aproximadamente de 60% de CH<sub>4</sub>, 30% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y 10% de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) <sup>19</sup>. Alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gas metano son producto de actividades humanas como la industria, la agricultura y el tratamiento de aguas residuales. El CH<sub>4</sub> es un gas de efecto invernadero 25 veces más nocivo que el CO<sub>2</sub>. Por tanto, su combustión tiene un efecto positivo sobre el medio ambiente <sup>20</sup>.

Se realizó un análisis de cromatografía de gases al biogás utilizado en las pruebas para determinar el poder calorífico el cual se encuentra en el Anexo A. Se determinó que aproximadamente 61% es CH<sub>4</sub>, y como este gas es el que aporta energía a la combustión se determina que el poder calorífico es de aproximadamente 20 MJ/m<sup>3</sup>.

Ventajas de utilizar biogás como combustible en motores que utilizan combustibles líquidos:

- Los motores operan sin detonación previa.
- La mezcla de combustible/aire es más homogénea, debido a que ambos son gaseosos.
- Hay ausencia de depósitos de carbono en las culatas, debido a una combustión completa.
- Hay menos cantidad de monóxido de carbono en los gases de escape.

---

<sup>19</sup> F. Osorio and J. Torres, "Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production," *Renew. Energy*, 2009, vol. 34, pp. 2164–2171.

<sup>20</sup> EPA, "Overview of Greenhouse Gases," *Greenhouse Gas Emissions*, 2017. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. [Accessed: 05-Aug-2019].

Las desventajas en el uso del biogás:

- Toxicidad
- Corrosión de los metales por presencia de  $H_2S$ .
- En la combustión se puede formar  $SO_2$  que es altamente toxico y corrosivo.
- Formación de hidratos y siloxanos <sup>21</sup>.

## 2.3 COMBUSTIÓN REAL

En los procesos de combustión que se presentan en la vida real siempre se presenta la combustión incompleta, aunque se agregue aire en exceso a la mezcla, debido a los siguientes factores: la mezcla no es homogénea dentro del cilindro del motor, la humedad relativa, la presión atmosférica, la composición del combustible y la diferencia de temperatura dentro del cilindro, entre otras.

Debido a los factores anteriormente mencionados la estequiometría de la combustión no es ideal, y es imposible predecir con exactitud la composición de los productos con base únicamente en el balance de masa. Por ello, la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos.

## 2.4 GRUPO ELECTRÓGENO

Un grupo electrógeno está compuesto por un motor de combustión interna acoplado a un alternador o generador, estas máquinas también son conocidas como síncronas debido a que la velocidad de rotación está vinculada rígidamente con la frecuencia [Hz] de la red de corriente con la cual trabaja.

**2.4.1 Funcionamiento con carga reducida de un grupo electrógeno.** Cuando se produce un funcionamiento en vacío o con carga reducida menor al 30% de la

---

<sup>21</sup> A. Estíbaliz and C. Jose, "Siloxanos en motores de gas," *Lubrication management*, 2014. [Online]. Available: [http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Siloxanos\\_motores\\_gas\\_ES.pdf](http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Siloxanos_motores_gas_ES.pdf). [Accessed: 05-Aug-2019].

potencia nominal, las condiciones de operación no permiten que el motor funcione en condiciones óptimas. La principal causa es la siguiente:

El reducido volumen de combustible quemado en la cámara de combustión genera una combustión incompleta; la energía térmica que se genera no permite alcanzar una temperatura óptima de funcionamiento del motor. El conjunto de estos factores conduce a que el motor se ensucie, especialmente en la segmentación de las válvulas, suciedad que conduce a:

Una aceleración del desgaste <sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> A. G. Jorge, S. V. Fabio, and P. Sergio, "Comportamiento de un motor diesel de 1.105 hp operado mediante el sistema dual-fuel con diesel - gas natural en campos petroleros," *Inf. Técnico*, 2014, vol. 78 N °1, p. 12.

### **3. PROTOCOLO DE PRUEBAS**

Las pruebas de verificación comprenden la realización de mediciones en varios niveles de carga, estas comienzan desde la potencia máxima obtenida y siguiendo una rampa descendiente de intervalo de 0,3 KW. El período de medición de la prueba será de dos a cinco minutos en cada intervalo de carga, iniciará una vez lograda la operación estable de la unidad generadora sometida a la prueba.

#### **3.1 PROTOCOLO PARA REALIZAR UNA REVISIÓN A GRUPOS ELECTRÓGENOS DE BAJA POTENCIA (MENORES A 3 KW)**

Para la elaboración de este protocolo se realizó una investigación bibliográfica de las normas para llevar a cabo las pruebas correspondientes. A continuación, se dará una breve descripción de las condiciones que se deben cumplir en las pruebas.

##### **3.1.1 Condiciones ambientales para realizar las pruebas según la norma NTC 4983**

- a) Temperatura ambiente entre 5°C y 55°C.
- b) Humedad relativa entre 30% y 90%.
- c) En caso de ser realizada en un recinto de pruebas, este debe contar con ventilación, evitándose la acumulación de gases de escape, que puede afectar el resultado de la prueba y la salud de los inspectores.
- d) Se deben registrar estas variables (temperatura de entrada del aire y su humedad relativa).

##### **3.1.2 Recomendaciones para las pruebas**

- 1. Nunca opere la máquina en un lugar cerrado, esto podría causar inconsciencia y la muerte en poco tiempo, opere el sistema en áreas ventiladas.
- 2. Un grupo electrógeno únicamente puede funcionar de forma estacionaria, y no podrá instalarse sobre un vehículo ni sobre cualquier otro material móvil durante la realización de la prueba.



3. Despejar el área de trabajo de elementos que no correspondan a las pruebas a realizar.
4. No manipule nunca un grupo electrógeno con las manos o los pies húmedos.
- 4.1 Lleve puestas gafas protectoras y guantes de carnaza al realizar las pruebas.
5. No realizar las pruebas cuando este lloviendo y cayendo rayos <sup>23</sup>.
6. Una exposición prolongada a un nivel sonoro superior a 80 dB puede provocar daños auditivos permanentes (se recomienda utilizar protección auditiva en caso de trabajar en las proximidades del equipo en funcionamiento).
7. No toque el motor durante su funcionamiento o inmediatamente después para evitar quemaduras.
8. Evite un re arranque inmediato después de una parada anormal.

**3.1.3 Procedimiento de verificación y operación.** Las pruebas se realizaron teniendo en cuenta la metodología planteada en la tabla 2, que se realizó basado en normatividad nacional e internacional (NTC 1930, NTC 2016, ISO 15550 e ISO 8528). Se deberá cumplir con el orden establecido para la experimentación con su respectiva verificación y cumplimiento, la cual se realizará por la persona responsable de la prueba.

**Tabla 2.** Procedimiento de verificación

|           |    |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| Descripción del procedimiento                                                                 | SI | NO |
| El equipo debe presentarse en perfecto estado de limpieza                                     |    |    |
| Ingreso de información referente al equipo                                                    |    |    |
| Verificar el nivel de aceite y de combustible del motor                                       |    |    |
| Verificar que los elementos de suspensión no estén rotos, deformados o con excesiva corrosión |    |    |
| Verificar que no existan fugas de combustible pre y post de la prueba.                        |    |    |

<sup>23</sup> überManuals, "Honda E3500 portable generator." [Online]. Available: <http://ubermanuals.com/product/honda-e3500-13337>. [Accessed: 31-Oct-2018].

|                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| Verificar que el sistema de admisión de aire este en mal estado (filtro roto, o deformado) o ausencia del filtro de aire.                                                                                                                                                                     |  |  |
| Verificar que el circuito de arranque esté en óptimas condiciones (cables con sus respectivos aislantes y recubrimientos, sin cables sueltos, entre otros) y su respectivo interruptor en "off".                                                                                              |  |  |
| Verificar el funcionamiento de las luces del tablero de instrumentos                                                                                                                                                                                                                          |  |  |
| Verificar roturas, perforaciones, desacople o inexistencia del sistema de escape                                                                                                                                                                                                              |  |  |
| Verificar que los pulsadores de la celda de carga estén en off.                                                                                                                                                                                                                               |  |  |
| Verificar la conexión del sistema de toma de datos a la energía eléctrica, la cual debe ser a una fuente externa del grupo electrógeno.                                                                                                                                                       |  |  |
| Prender el sistema de toma de datos.<br>Iniciar el software que se esté utilizado para el registro y monitoreo de los datos y empezar a guardar los datos.                                                                                                                                    |  |  |
| Encender el grupo electrógeno:                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |
| 1.1 Verificar que no exista o halla carga sobre el grupo electrógeno                                                                                                                                                                                                                          |  |  |
| 1.2 Cambiar el interruptor de encendido a "on".                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |
| 1.3 Realizar la acción necesaria para prender el equipo.                                                                                                                                                                                                                                      |  |  |
| Tras poner en marcha el motor, hágalo funcionar a una velocidad de ralentí baja durante 5 a 10 minutos para que se caliente. (Empiece por trabajar una vez realizada esta operación)                                                                                                          |  |  |
| Registrar el comportamiento de la temperatura del aceite en esta condición hasta llegar a estado estable.                                                                                                                                                                                     |  |  |
| Verificar el estado de los filtros y de la sonda (analizador de gases), y eliminar el material particulado, el agua o la humedad y toda sustancia extraña que pueda alterar las lecturas de la muestra.                                                                                       |  |  |
| Encender e inicializar el analizador de gases, asegurándose del correcto estado de mantenimiento, calibración, verificación y puesta a punto de este, de acuerdo con las instrucciones contenidas en el manual de operación provisto por el fabricante y lo contemplado en la presente norma. |  |  |
| Antes de la realización de cada prueba, se debe realizar la comprobación del ajuste a cero y la comprobación de residuos. (En caso de que las condiciones anteriores no se cumplan satisfactoriamente, el analizador se debe bloquear automáticamente, hasta corregir el error).              |  |  |
| Ubicar el analizador de gases en el tubo de escape del grupo electrógeno (procurar que en el sistema de escape de gases y analizador no ingrese aire del ambiente).                                                                                                                           |  |  |
| Antes de detener el motor, déjelo funcionar en ralentí durante 5 a 6 minutos para que se enfríe (Si se detiene el motor inmediatamente después de un funcionamiento a alta carga, las piezas del motor se calentarán y se acortará la vida útil del motor).                                   |  |  |
| Apagar los sensores.                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |

### 3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para este proyecto se optó por un diseño simple el cual está dirigido especialmente para diseño de experimentos de mezclas experimentales:

- Los ingredientes serán: gasolina y biogás.
- Las variables controlables son: la relación de mezcla gasolina-biogás, el factor  $\lambda$  y la carga sobre el grupo electrógeno.
- Las variables no controlables: la presión atmosférica, la temperatura del aire, la humedad relativa y las emisiones.
- Los variables (datos) de salida serán: la potencia generada (KWatts), el consumo de combustible (gasolina (g/h) y biogás ( $\text{m}^3/\text{h}$ )), gases de escape ( $\text{CO}$  (%V),  $\text{CO}_2$  (%V),  $\text{O}_2$  (%V) y  $\text{HC}$  (ppm)), temperatura de los gases de escape ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$ , frecuencia (Hz), presión atmosférica (Pa) y condiciones del aire a la entrada del sistema de admisión (temperatura y humedad relativa).

Se realizaron las pruebas con las tres mezclas de forma consecutiva y aleatoria para disminuir el efecto de las variables no controladas, cada vez que se cambió el orificio de dosificación de combustible (chicler) se apagó el motor.

**3.2.1 Primera fase.** Determinación de la línea base de comparación del grupo electrógeno. Para el posterior análisis del comportamiento del sistema de los combustibles de estudio, se estableció el desempeño con gasolina ya que el grupo electrógeno fue diseñado y construido para trabajar con este combustible, en los modos de operación seleccionados, véase la tabla 3.

La selección de los modos de operación se realizó mediante pruebas preliminares, verificando que el grupo electrógeno alcanzará los niveles de potencia esperados, una vez supuestos las caídas de potencia debidas al aumento de altura sobre el nivel del mar, y a las pérdidas propias en el generador. También se realizó una

prueba utilizando solo biogás como combustible, para analizar su comportamiento y emisiones producidas.

**Tabla 3.** Niveles de carga en las pruebas

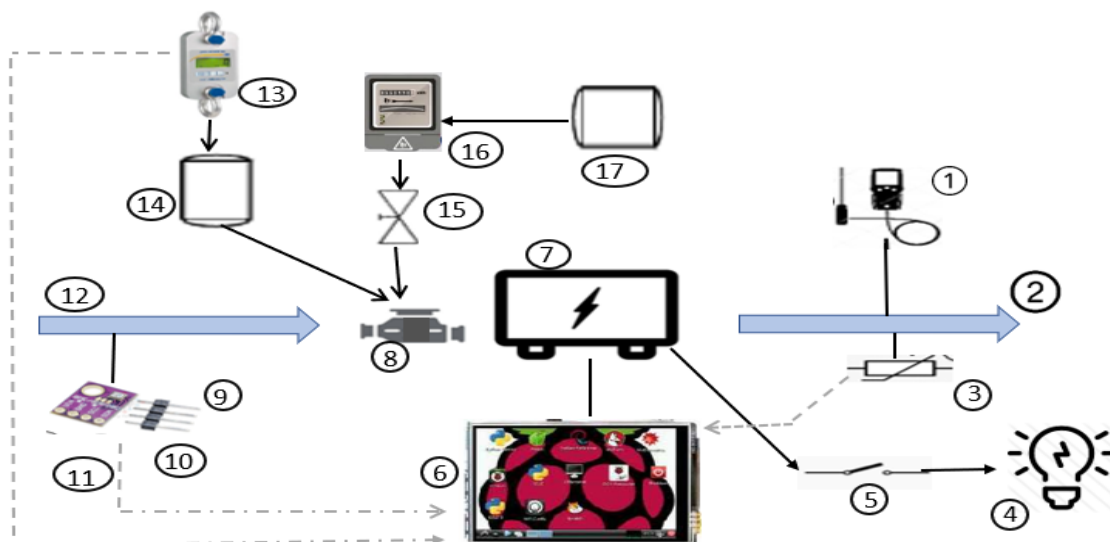
| Modo | Régimen de giro | Carga (%) | Potencia eléctrica (KW) |
|------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 1    | 3600 (RPM)      | 0         | 0                       |
| 2    |                 | 12,5      | 0,3                     |
| 3    |                 | 25        | 0,6                     |
| 4    |                 | 37,5      | 0,9                     |
| 5    |                 | 50        | 1,2                     |
| 6    |                 | 62,5      | 1,5                     |
| 7    |                 | 75        | 1,8                     |
| 8    |                 | 87,5      | 2,1                     |

**3.2.2 Segunda fase: Evaluación del comportamiento del grupo electrógeno con mezclas y selección de los niveles de sustitución.** En esta fase se observó la respuesta del motor al utilizar las mezclas biogás-gasolina, se verificó que su funcionamiento fuera estable y no se presentará un comportamiento anómalo en el proceso de combustión mediante la observación de la potencia generada, la frecuencia, el voltaje, los consumos de combustible y el ruido producido.

### 3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

Con el objetivo de realizar las pruebas, evaluar la potencia generada y los gases de escape de un grupo electrógeno utilizando la mezcla de un combustible líquido/gaseoso, se realizó un montaje general como se observa en la figura 1.

**Figura 1.** Esquema y componentes del montaje de experimentos



| No | Descripción                                  | No | Descripción                          |
|----|----------------------------------------------|----|--------------------------------------|
| 1  | Analizador de gases de escape                | 10 | Sensor de humedad relativa           |
| 2  | Gases de escape                              | 11 | Sensor de presión atmosférica        |
| 3  | Sensor de temperatura de los gases de escape | 12 | Ingreso de aire                      |
| 4  | Banco de carga                               | 13 | Tanque de almacenamiento de gasolina |
| 5  | Controlador manual de carga                  | 14 | Sensor gravimétrico                  |
| 6  | Sistema de adquisición de datos              | 15 | Válvula de control de biogás         |
| 7  | Grupo electrógeno                            | 16 | Medidor de gas                       |
| 8  | Carburador                                   | 17 | Tanque de almacenamiento de biogás   |
| 9  | Sensor de temperatura de aire atmosférico    |    |                                      |

La información de los dispositivos utilizados en las pruebas se encuentra en el Anexo B.

El montaje general se describe en la figura 2 y, donde el biogás se encuentra en una bolsa de membrana a condiciones atmosféricas.

**Figura 2.** Montaje general de los equipos



### 3.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos que se mencionan a continuación son seleccionados cuando el sistema sea estabilizado y dentro del tiempo previsto para cada nivel. Se realizó e implemento un formato para las pruebas (ver figura 3) la información solicitada es; lugar de la prueba, datos del grupo electrógeno, información del equipo analizador de gases y resultados obtenidos de los gases de escape. En el Anexo C se encuentra el formato de la prueba de gasolina.

**Figura 3.** Formato de las pruebas

| FORMATO UNIFORME DE RESULTADOS DE LA REVISIÓN DEL GRUPO ELECTROGÉNO Y DE EMISIONES CONTAMINANTES |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------|
|               |  |                             |  |                                        |  |  |  |  |  |                      |
| 1. INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE REALIZA LA PRUEBA                                              |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| FECHA                                                                                            |  | DIRECCIÓN                   |                                                                                      | CIUDAD                                 |  | DEPARTAMENTO                                                                          |  | PAÍS                                                                                  |  |                      |
| HORA DE INICIO PRUEBA                                                                            |  | HORA DE FINALIZACIÓN PRUEBA |                                                                                      | POSICIÓN SATELITAL                     |  | RESIÓN ATMOSFERICA [KP]                                                               |  |                                                                                       |  |                      |
| CORREO ELECTRONICO                                                                               |  |                             |                                                                                      | FAX                                    |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| 2. DATOS DEL EQUIPO                                                                              |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| SERVICIO                                                                                         |  | MARCA                       |                                                                                      | MODELO                                 |  | POTENCIA [KWatts]                                                                     |  | COMBUSTIBLE                                                                           |  | TIPO DE ENFRIAMIENTO |
| TIPO DE MOTOR                                                                                    |  | VOLTAJE [V]                 |                                                                                      | CILINDRADA                             |  | ENCENDIO                                                                              |  | FRECUENCIA                                                                            |  | PESO                 |
|                                                                                                  |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| PROTECCIÓN                                                                                       |  | VELOCIDAD MAXIMA            |                                                                                      | PAÍS DE PROCEDENCIA                    |  | NÚMERO DE HORAS DE SERVICIO                                                           |  |                                                                                       |  |                      |
|                                                                                                  |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| 3. DATOS DEL EQUIPO ANALIZADOR DE GASES                                                          |  |                             |                                                                                      |                                        |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| MARCA DEL EQUIPO                                                                                 |  | NÚMERO DE SERIE (S.N.)      |                                                                                      | MODELO                                 |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |
| AÑO DE PRODUCCIÓN                                                                                |  | PAÍS DE PROCEDENCIA         |                                                                                      | FECHA Y HORA DE LA ÚLTIMA VERIFICACIÓN |  |                                                                                       |  |                                                                                       |  |                      |

A continuación, se dará una breve descripción de los componentes del montaje experimental:

- Para realizar el estudio del comportamiento de los gases de la combustión se utilizó un analizador de gases BrainBee tipo AGS-690, el cual registra los hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y la relación Lambda ( $\lambda$ ) <sup>24</sup>. Este equipo cumple con la norma NTC 4983.
- En cada nivel de carga se tomaron de tres a cinco datos, los cuales el software (OMNIBUS 800) del analizador de gases los genera en un PDF, en el anexo E se encuentra la plantilla como se visualizan los datos, la cual se obtuvo para gasolina a 2,1 KW.
- Se cuenta con un sistema de adquisición de datos desarrollado por el estudiante de Maestría de Ingeniería Mecánica Franklin Julián Patiño Molina. Se configuró el software de tal manera que, realice una toma de datos cada 8 segundos para cada sensor, la información obtenida se convierte en un archivo de xlsx.
- Se utilizó un contador de gas tipo diafragma para medir el caudal del biogás, sus especificaciones están en el Anexo B. La toma de datos se realizó de forma manual con ayuda de un cronometro.

### 3.5 MODIFICACIONES

**3.5.1 Configuración al flujo de gasolina.** El sistema que se utiliza a la entrada del motor es un carburador convencional, el cual es el encargado de mezclar el combustible con el aire <sup>25</sup>.

---

<sup>24</sup> GLOBATECH, "Analizador de gases Brain Bee AGS-690," 2019. [Online]. Available: <https://www.globaltechla.com/product/analizador-de-gases-brain-bee/>. [Accessed: 05-Aug-2019].

<sup>25</sup> S. Miguel, "¿Cómo funciona un carburador?," *La Escudería*, 2018. [Online]. Available: <https://www.escuderia.com/como-funciona-carburador-video/>. [Accessed: 05-Aug-2019].

El sistema de alimentación de gasolina a la mezcla se configuró en tres medidas inferiores a la original véase en la tabla 4, esperando bajar el flujo de líquido, esto se consiguió rellenando el orificio de su sección transversal (chicler) con estaño y luego perforándolo con unas brocas milimétricas que se consiguen en el mercado, en la figura 4 se muestran los elementos anteriormente mencionados.

**Tabla 4.** Dimensiones del chicler para cada mezcla



**Figura 4.** Chicleros y brocas milimétricas

| Mezclas    | Dimensiones del chicler (mm) |
|------------|------------------------------|
| Mezcla I   | 0,3                          |
| Mezcla II  | 0,4                          |
| Mezcla III | 0,5                          |

**3.5.2 Configuración al flujo de biogás.** En la figura 2 se muestra esquemáticamente las modificaciones hechas al ducto de admisión para el suministro de biogás al motor. La presión de almacenamiento del biogás se encuentra desde la presión atmosférica hasta un máximo de 8 cm de columna de agua. Para el mezclado del biogás con el aire se utilizó un mezclador desarrollado por el estudiante de maestría Franklin Patiño como parte de su proyecto (ver figura 5), y se instaló en la entrada del mezclador una llave de paso para variar el paso de biogás. El factor de  $\lambda$  se ajustó a la potencia máxima generada con cada mezcla, y se procuró que este valor fuera mayor a uno, esto se logró con el caudal de biogás.



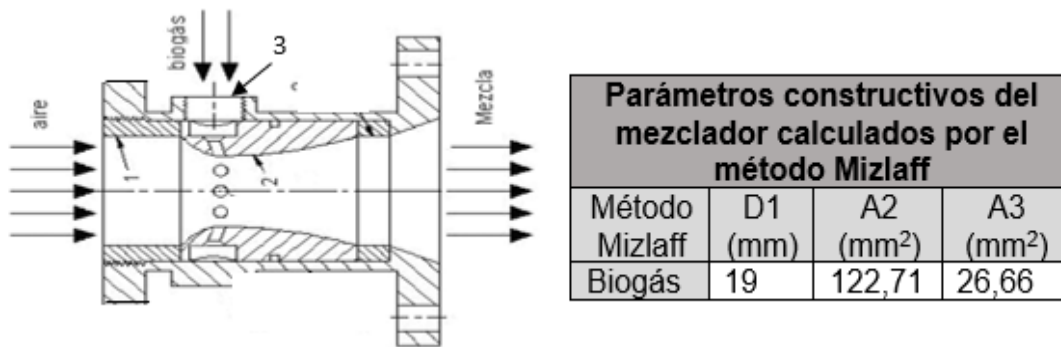
**3.5.2.1 Mezclador.** La función del mezclador es dosificar el ingreso de la mezcla aire-combustible (biogás) a la admisión del motor, en la proporción óptima requerida para una perfecta combustión.

**Figura 5.** Mezclador de biogás



En la figura 6 se muestra el esquema del dosificador y sus dimensiones.

**Figura 6.** Esquema del mezclador de biogás.



### 3.6 SITIO DE PRUEBAS

El biogás utilizado en este estudio se obtuvo en una granja colombiana ubicada a una latitud de N7°11'39.90" O73°04'34.62", con una altitud de 967 m sobre el nivel del mar (m.a.s.l.) y una precipitación promedio de 670 mm/m<sup>2</sup>. La presión atmosférica del lugar es de 90350 Pa. La finca está ubicada a 12 km del área urbana de Bucaramanga tomando una vía terciaria. En la figura 7 se observa el biodigestor.

**Figura 7.** Digestor en el sitio de pruebas.

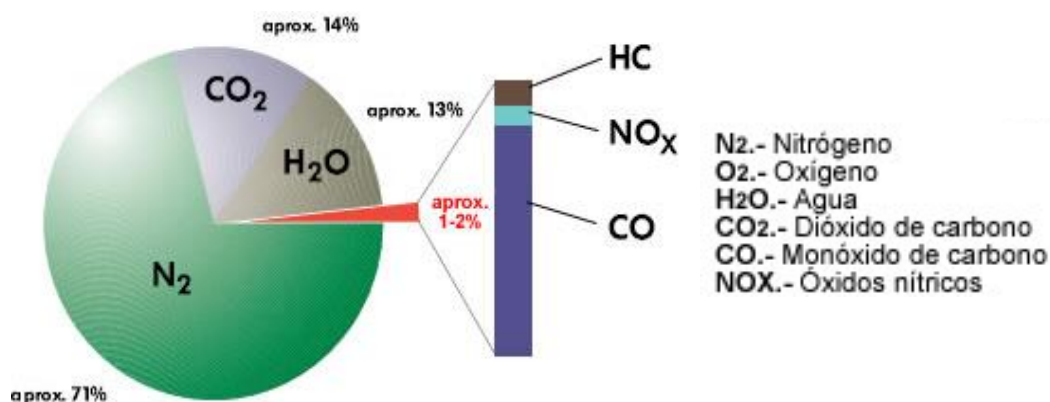


El grupo electrógeno y los instrumentos de medición fueron llevados hasta el lugar, e instalados cerca al reservorio de biogás.

#### 4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS COMBUSTIBLES

Una combustión completa, donde el combustible y el oxígeno se queman por completo solo produce  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Sin embargo, este proceso no ocurre en la realidad, y los gases que se producen de la combustión son los anteriormente mencionados y  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HC}$  entre otros. La producción de estos compuestos se debe a que en la combustión siempre queda algo sin quemar, en la figura 8 se puede observar la concentración de los gases producto de la combustión de gasolina.

**Figura 8.** Composición de los gases de escape de motores de ciclo Otto



Fuente: sitio web <http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>

##### 4.1 ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos para determinar son principalmente:

- Aire necesario para la combustión.
- Productos de la combustión y su composición.

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible.

Dada una combustión idea, se realiza un análisis estequiométrico de la combustión:



Donde  $a_s$ : número de moles de oxígeno teórico por mol de combustible

$$a_s = \alpha + \beta/4 - \gamma/2$$

**4.1.1 Balance de especies.** Durante un proceso de combustión, los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se denominan productos. Las ecuaciones químicas se balancean con base en el principio de la conservación de la masa, el cual establece que la masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química <sup>26</sup>.

- Balance de Carbono:  $\alpha = n_1$
- Balance de Hidrógeno:  $\beta = 2 * n_2$
- Balance de Nitrógeno:  $\delta + (2 * 3.76 * a_s * \lambda) = 2 * n_3$
- Balance de Oxígeno:  $\gamma + 2 * a_s * \lambda = 2 * n_1 + n_2 + 2 * n_4$

**4.1.2 Parámetros de combustión.** Los MCI no se diseñan para operar en unas condiciones fijas de funcionamiento, sino que tienen un amplio rango de variación que les permite acomodarse a los requerimientos de uso. Estos parámetros son decisivos a la hora de evaluar el funcionamiento de un motor porque proporciona información relativa del rendimiento, emisiones y potencia, las cuales son significativas para comprender como varían por cada combustible (gasolina y biogás) de estudio:

a) Masa molecular de los humos húmedos:  $M_{HHumedos} = \sum x_i M_i(\text{humos})$

b) Masa molecular de los humos secos:  $M_{Hsecos} = M_{HHumedos} - M_{H_2O}$

---

<sup>26</sup> C. Yunus, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. México: McGraw-Hill, 2004.

c) Relación aire-combustible teórica ideal: es el análisis del proceso de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire.

$$A_s = m_{\text{aire\_teorica}}/m_{\text{combustible}} = \frac{28.85 (4.76 \cdot a_s)}{(12.01 \cdot \alpha + 1.008 \cdot \beta + 16 \cdot \gamma + 14.10 \cdot \delta)} \quad (\text{kg aire/kg combustible})$$

d) Factor de aire de la combustión  $\lambda$  (Lambda):

- $\lambda < 1$ : significa que el aire se suministra en defecto, la mezcla es rica y la combustión es reductora.
- $\lambda > 1$ : se tiene aire en exceso, la mezcla inflamable es pobre y la combustión se dice que es oxidante.
- Para el ejemplo de la combustión ideal  $\lambda = 1$ .
- $\lambda = m_{\text{aire\_real\_admitido}}/m_{\text{aire\_teorico\_necesario}}$ .

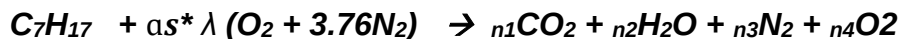
e) Cantidad de aire para que haya combustión completa

Para la combustión completa de 1 mol de combustible se requieren  $a_s$  moles de  $O_2$ , y  $a_s \times 4.76 = n$  moles de aire. Si consideramos que el aire seco es un gas ideal tendremos:

$$V_{\text{aire}} = \frac{nRT}{P} \quad (\text{m}^3/\text{mol de combustible})$$

## 4.2 COMBUSTIÓN TEÓRICA DE GASOLINA

Con ayuda de las ecuaciones de la sección 4.1 se realizará el análisis de la combustión teórica ( $\lambda = 1$ ) de gasolina:



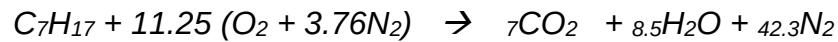
- La cantidad de moles de oxígeno teórico por mol de combustible es

$$a_s = 7 + 17/4 = 11.5$$

- Balance de Carbono:  $7 = n_1$ , lo cual nos indica que se producen siete moles de  $CO_2$  por cada mol de combustible ( $C_7H_{17}$ ).
- Balance de Hidrogeno:  $17 = 2 \cdot n_2$ , se producen 8,5 moles de  $H_2O$  por cada mol de combustible ( $C_7H_{17}$ ).

- Balance de Nitrógeno:  $2 \cdot 3.76 \cdot 11.25 = 2 \cdot n_3$ , se producen 42,3 moles de  $N_2$  por cada mol de combustible ( $C_7H_{17}$ ).

- Balance de Oxígeno:  $2 \cdot 11.25 = 2 \cdot 7 + 8.5 + 2 \cdot n_4$ . No se producen moles  $O_2$  libre en los productos, debido a que todo el oxígeno que ingresó a la combustión se convirtió en  $CO_2$  y  $H_2O$ , la ecuación balanceada es:



#### 4.2.1 Parámetros de combustión de gasolina

a) En la tabla 5 se presenta la composición de los humos húmedos en los productos:

**Tabla 5.** Composición de los humos húmedos de la gasolina

| Composición           | g/mol | % mol  | gr     | % peso |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 7     | 12.11  | 308    | 18.72  |
| <b>H<sub>2</sub>O</b> | 8.5   | 14.706 | 153    | 9.3    |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 42.3  | 73.18  | 1184.4 | 71.98  |
| <b>Total</b>          | 57.8  | 100    | 1645.4 | 100    |

Donde se producen de masa de humos húmedos:  $M_{HH} = 1645.4$  (kg/kmol)

b) La composición de los humos secos se muestra en la tabla 6:

**Tabla 6.** Composición de los humos secos de la gasolina

| Composición           | g/mol | % mol | gr     | % peso |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 7     | 14,20 | 308    | 20,64  |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 42,3  | 85,80 | 1184,4 | 79,36  |
| <b>Total</b>          | 49,3  | 100   | 1492,4 | 100,00 |

Donde se producen de masa de humos secos:  $M_{HS} = 1492.4$  [kg/kmol]

c) La relación aire-combustible teórica ideal es:

$$A_s = m_{aire\_teorica}/m_{combustible} = \frac{28.85 (4.76 \cdot 11.5)}{(12.01 \cdot 7 + 1.008 \cdot 17)} \text{ (kg aire/kg combustible)}$$

Donde  $A_s = 15.27$  (kg aire/kg combustible)

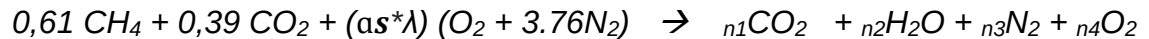
d) Cantidad de aire para que haya combustión completa:

Entonces, para la combustión completa de 1 mol de gasolina se requieren 11.25 moles de  $O_2$ , y  $11.25 \times 4.76 = 53.55$  moles de aire. Si consideramos que el aire seco es un gas ideal tendremos:

$$V_{\text{aire}} = \frac{nRT}{P} = \frac{53.55 \times 8.314 \times 303}{90350} = 1.493 \text{ (m}^3\text{/mol de combustible)}$$

### 4.3 COMBUSTIÓN TEÓRICA DEL BIOGÁS

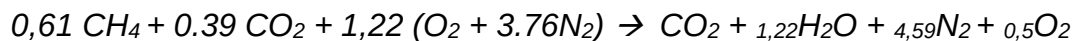
Con ayuda de las ecuaciones de la sección 4.1 se realizará el análisis de la combustión teórica ( $\lambda = 1$ ) del biogás:



- La cantidad de moles de oxígeno teórico por mol de combustible es:

$$a_s = (0,61 + 0,39) + (0,61 \times 4) / 4 - (0,39 \times 2) / 2 = 1,22$$

- Balance de Carbono:  $n_1 = 1$ , lo cual nos indica que se producen un mol de  $CO_2$  por cada mol de combustible (*biogás*).
- Balance de Hidrógeno:  $0,61 \times 4 = 2 \times n_2$ , se producen 1,22 moles de  $H_2O$  por cada mol de combustible (*biogás*).
- Balance de Nitrógeno:  $2 \times 3.76 \times 1,22 = 2 \times n_3$ , se producen 4,59 moles de  $N_2$  por cada mol de combustible (*biogás*).
- Balance de Oxígeno:  $2 \times 0,39 + 1,22 \times 2 = 2 \times 1 + 1,22 + 2 \times n_4$ . No se produce  $O_2$  libre en los productos, debido a que todo el oxígeno que ingresó a la combustión se convirtió en  $CO_2$  y  $H_2O$ , la ecuación balanceada es:



#### 4.3.1 Parámetros de combustión de biogás

a) La composición de los humos húmedos está en la tabla 7;

**Tabla 7.** Composición de los humos húmedos del biogás

| Composición      | g/mol | % mol | gr     | % peso |
|------------------|-------|-------|--------|--------|
| CO <sub>2</sub>  | 1     | 13,68 | 44     | 27,13  |
| H <sub>2</sub> O | 1,22  | 16,7  | 21,92  | 13,51  |
| N <sub>2</sub>   | 4,59  | 62,79 | 64,26  | 39,62  |
| O <sub>2</sub>   | 0,5   | 6,83  | 16     | 19,73  |
| Total            | 7,31  | 100   | 162,18 | 100    |

Donde se producen de masa de humos húmedos:  $M_{\text{Humedos}} = 162,18$  (kg/kmol)

b) La composición de los humos secos se presenta en la tabla 8;

**Tabla 8.** Composición de los humos secos del biogás

| Composición     | g/mol | % mol | gr     | % peso |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|
| CO <sub>2</sub> | 1     | 16,42 | 44     | 35,4   |
| N <sub>2</sub>  | 4,59  | 75,37 | 64,26  | 51,71  |
| O <sub>2</sub>  | 0,5   | 8,21  | 16     | 12,88  |
| Total           | 6,09  | 100   | 124,26 | 100,00 |

Donde se producen de masa de humos secos:  $M_{\text{HSecos}} = 124,26$  (kg/kmol)

c) Relación aire-combustible teórica ideal:

$$A_s = m_{\text{aire\_teorica}}/m_{\text{combustible}} = \frac{28.85 (4.76 \cdot 1,22)}{(12.01 \cdot 1 + 1.008 \cdot 4 + 16 \cdot 0,78)} \text{ (kg aire/kg combustible)}$$

Donde  $A_s = 5,874$  (kg aire/kg combustible)

Entonces, para la combustión completa de 1 mol de biogás se requieren 1,22 moles de O<sub>2</sub>, y  $1,22 \times 4.76 = 5,81$  moles de aire. Si consideramos que el aire seco es un gas ideal tendremos:



$$V_{\text{aire}} = \frac{nRT}{P} = \frac{5,81 \times 8.314 \times 303}{90350} = 0,162 \text{ (m}^3\text{/mol de combustible)}$$

Se observa que la combustión de biogás requiere menor cantidad de aire, pero esto disminuye la eficiencia volumétrica considerablemente, debido a que el combustible en estado gaseoso ocupa el espacio del aire, formando un bloqueo e impidiendo que este entre en mayor cantidad al motor <sup>27</sup>.

---

<sup>27</sup> R. S. Miguel Ángel, "Evaluación de desempeño de un grupo electrogénico con carga variable," Universidad de Chile, 2017.

## 5. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS

Con el objetivo de realizar el estudio del desempeño energético del grupo electrógeno, se mostrarán los datos obtenidos utilizando los diferentes combustibles y su respectivo análisis, iniciando con gasolina comercial debido a que el equipo viene diseñado y construido para trabajar con este combustible.

### 5.1 CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y POTENCIA GENERADA

El consumo de combustible varía, incluso con la misma carga en diferentes modos de operación. Entonces, para comparar los resultados obtenidos de las pruebas en diferentes condiciones de carga o diferentes modos de operación, debe normalizarse a unidad de energía generada (MJ/KW-h) <sup>28</sup>.

**5.1.1 Consumo específico de gasolina y biogás.** Los datos de consumo de combustible y la potencia generada se muestran en la tabla 9 para cada combustible (gasolina y biogás) de estudio base. Para comparar los resultados obtenidos en las pruebas a diferentes condiciones de carga y usando diferentes combustibles, los valores obtenidos fueron normalizados como Consumo Especifico de Energía (MJ/KW-h) <sup>29</sup>, como se observa en la siguiente ecuación.

$$CEE = \frac{\dot{U} (m^3/h) * QHV_{biogas} (MJ/m^3) + \dot{m} (kg/h) * QHV_{oil} (MJ/kg)}{PE (KW)}$$

Donde:

$\dot{U}$  (m<sup>3</sup>/h): Flujo volumétrico de biogás

$QHV_{biogás}$  (MJ/m<sup>3</sup>): Poder Calorífico del biogás

---

<sup>28</sup> N. K. Vallentyne Vinod, K. Tara, and R. UMA, "Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes," *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 27, pp. 195–203.

<sup>29</sup> P. TSIETSI, M. Mansoor, and M. Edinson, "Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter," *Aerosol Air Qual. Res.*, 2012, vol. 12, pp. 994–1006..

$\dot{m}$ : Flujo másico de gasolina

$QHV_{oil}$  (MJ/kg): Poder calorífico de la gasolina

PE: Potencia generada

La eficiencia térmica del grupo electrógeno (motor acoplado a generador eléctrico) se calculó usando la siguiente ecuación;

$$\eta_{e,f} = PE / \dot{m}_{combustible} * QHV$$

Donde:

$\eta_{e,f}$ : Eficiencia térmica del grupo electrógeno (adimensional)

PE: Potencia generada

$\dot{m}_{combustible}$ : Flujo de combustible

$QHV$ : Poder calorífico Superior del combustible utilizado

$QHV_{biogás}$  (MJ/m<sup>3</sup>) y  $QHV_{oil}$  (MJ/kg)

**Tabla 9.** Consumo de combustible, potencia entregada y consumo específico de energía de gasolina y biogás.

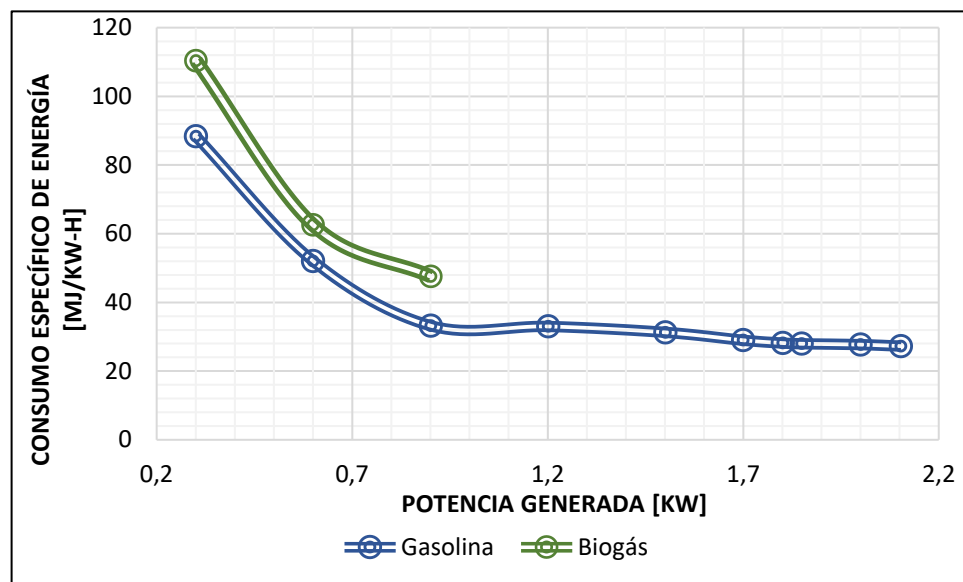
| Potencia generada (Pe) [KW] | Gasolina |                  |               |                  | Biogás   |                               |               |                  |
|-----------------------------|----------|------------------|---------------|------------------|----------|-------------------------------|---------------|------------------|
|                             | $\sigma$ | $\dot{m}$ [Kg/h] | CEE [MJ/KW-h] | $\eta_{e,f}$ [%] | $\sigma$ | $\dot{U}$ [m <sup>3</sup> /h] | CEE [MJ/KW-h] | $\eta_{e,f}$ [%] |
| <b>2,10</b>                 | 1,2      | 1,23             | 27,3          | 13,2             |          |                               |               |                  |
| <b>2,00</b>                 | --       | 1,19             | 27,7          | 13,0             |          |                               |               |                  |
| <b>1,85</b>                 | --       | 1,11             | 28,0          | 12,9             |          |                               |               |                  |
| <b>1,80</b>                 | 0,7      | 1,09             | 28,2          | 12,8             |          |                               |               |                  |
| <b>1,70</b>                 | --       | 1,06             | 29,0          | 12,4             |          |                               |               |                  |
| <b>1,50</b>                 | 1,8      | 1,01             | 31,3          | 11,5             |          |                               |               |                  |
| <b>1,20</b>                 | 0,3      | 0,85             | 33,0          | 10,9             |          |                               |               |                  |
| <b>0,90</b>                 | 0,3      | 0,64             | 33,2          | 10,8             | 2,9      | 2,15                          | 47,60         | 7,6              |
| <b>0,60</b>                 | 1,3      | 0,67             | 52,0          | 6,9              | 2,7      | 1,88                          | 62,52         | 5,8              |
| <b>0,30</b>                 | 0,7      | 0,57             | 88,3          | 4,1              | 0,5      | 1,66                          | 110,36        | 3,3              |
| <b>0,00</b>                 | 0,0      | 0,50             | ---           | 0,0              | 0,0      | 1,42                          | --            | 0,0              |

La potencia máxima que produjo el grupo electrógeno utilizando como combustible gasolina fue de aproximadamente 2,1 (KW), la cual es el 87,5% de la carga nominal que puede generar el equipo. Si solo se utiliza biogás como combustible se obtiene

aproximadamente 0.9 (KW), y disminuye la potencia generada en aproximadamente 57% con respecto a la gasolina.

Para comprender los datos de la tabla 8 y el funcionamiento de un grupo electrógeno se realiza la gráfica 1, donde se evidencia la tendencia del consumo específico de energía respecto a la potencia generada utilizando como combustible gasolina y/o biogás.

**Gráfica 1.** Consumo específico de energía vs Potencia generada de la gasolina y el biogás.



La tendencia que se observa en la línea azul es que se aprovecha mejor el combustible cuando el grupo electrógeno funciona en un rango de carga mayor al 70% de su carga nominal <sup>30 31</sup>.

<sup>30</sup> R. S. Miguel Ángel, "Evaluación de desempeño de un grupo electrogeno con carga variable," Universidad de Chile, 2017.

<sup>31</sup> F. Carlos, A. Jorge, and S. V. Fabio, "Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo," *Ing. Mecánica*, 2014, vol. 17 No °13, pp. 205–215.

La baja potencia obtenida del biogás se debe a la cantidad de metano en el gas, es necesario introducir una mayor cantidad de masa de biogás para desarrollar la misma potencia obtenida con gasolina, lo que obviamente disminuye la disponibilidad de espacio para el aire al interior del cilindro. Igualmente, se debe recordar que por tener una relación aire/combustible estequiométrica tan baja y una densidad cercana a uno, se espera una entrada considerable de biogás al motor <sup>32</sup>. Otro factor que mejoraría la combustión sería adelantar el ángulo de encendido de la chispa según la bibliografía consultada, este efecto se ve reflejado en la temperatura de los gases de escape los cuales serán mostrados más adelante <sup>33</sup>.

**5.1.2 Consumo de combustible y potencia generada de las mezclas gasolina-biogás.** La tabla 10 muestra los resultados de consumo de combustible de las pruebas para cada mezcla, el CEE de cada combustible, el nivel de sustitución y la eficiencia.

**Tabla 10.** Consumo de combustible y potencia entregada de las mezclas.

| Potencia generada (Pe) [KW] | Mezcla I |                  |                               |                         |               |                 | Mezcla II |                  |                               |                         |               |                 | Mezcla III |                  |                               |                         |               |                 |
|-----------------------------|----------|------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|------------|------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|
|                             | $\sigma$ | $\dot{m}$ [Kg/h] | $\dot{U}$ [m <sup>3</sup> /h] | Tasa de sustitución [%] | CEE [MJ/KW-h] | $\eta_{ef}$ [%] | $\sigma$  | $\dot{m}$ [Kg/h] | $\dot{U}$ [m <sup>3</sup> /h] | Tasa de sustitución [%] | CEE [MJ/KW-h] | $\eta_{ef}$ [%] | $\sigma$   | $\dot{m}$ [Kg/h] | $\dot{U}$ [m <sup>3</sup> /h] | Tasa de sustitución [%] | CEE [MJ/KW-h] | $\eta_{ef}$ [%] |
| 2,10                        |          |                  |                               |                         |               |                 |           |                  |                               |                         |               |                 |            |                  |                               |                         |               |                 |
| 2,00                        |          |                  |                               |                         |               |                 |           |                  |                               |                         |               |                 | 2,2        | 0,88             | 0,13                          | 26,24                   | 21,7          | 16,6            |
| 1,85                        |          |                  |                               |                         |               |                 | 0,6       | 0,70             | 0,45                          | 37,39                   | 22,4          | 16,10           | --         | 0,80             | 0,12                          | 27,59                   | 22,2          | 16,7            |
| 1,80                        |          |                  |                               |                         |               |                 | --        | 0,68             | 0,41                          | 37,13                   | 22,3          | 16,14           | 0,8        | 0,78             | 0,12                          | 28,16                   | 22,9          | 16,7            |
| 1,70                        | 1,3      | 0,46             | 1,22                          | 56,95                   | 26,89         | 13,4            | --        | 0,66             | 0,35                          | 37,27                   | 22,3          | 16,13           | --         | 0,74             | 0,12                          | 30,04                   | 24,5          | 16,6            |
| 1,50                        | 0,6      | 0,41             | 1,10                          | 59,31                   | 27,35         | 13,2            | 16        | 0,62             | 0,26                          | 38,37                   | 22,8          | 15,8            | 0,8        | 0,67             | 0,11                          | 34,00                   | 27,7          | 16,2            |
| 1,20                        | 1,2      | 0,38             | 0,97                          | 55,81                   | 30,59         | 11,8            | 0,3       | 0,56             | 0,23                          | 34,42                   | 25,4          | 14,1            |            |                  |                               |                         |               |                 |

Con respecto a las pruebas usando mezclas gasolina-biogás se observó que para la mezcla I y II el equipo no funciona de manera estable cuando se trabaja con

<sup>32</sup> B. C. Ivan, "Estudio de la influencia del sistema de mezclado y la calidad del combustible piloto en el desempeño de un motor dual," Universidad de Antioquia, 2007.

<sup>33</sup> M. G. Miguel, A. J. Javier, and S. Andres, "Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible Experimental," *Ing. e Investig.*, 2008, vol. 28, p. 11.

cargas menores al 50% de la carga nominal y para la mezcla III ocurre lo mismo a cargas inferiores al 60%. Estos resultados no son coincidentes a los reportados por Sahoo 2009, en donde el motor no presenta pérdida de estabilidad ni velocidad de respuesta ante cambios de carga <sup>34</sup>. Esto se debe a que el valor de lambda es mayor a 1,15 y la mezcla es muy pobre. Por esta razón, no se trabajó en estos rangos de carga para proteger el motor, resaltando que lo que se busca es lograr el mayor aprovechamiento de la energía química del combustible <sup>35</sup>.

Se identificó también que el CEE se incrementó a medida que se reducía la carga del equipo, esto implica una considerable pérdida de eficiencia en condiciones de carga baja.

Por lo cual se recomendó operar los equipos siempre cerca de su carga nominal; adicionalmente, se observó que el CEE es mayor cuando se opera con sistema dual-fuel, lo cual puede obedecer al poder calorífico del gas y la velocidad de la llama <sup>36</sup>.

La implementación del biogás en los Motores de Encendido por Chispa (MEP) tiende a producir menos energía que cuando son operados con combustible líquido fósil. La razón de este fenómeno es una disminución en la eficiencia volumétrica en la cámara de combustión al ser el biogás un combustible gaseoso que ocupa una mayor porción de volumen en la mezcla aspirada por el motor. Para el caso de la gasolina, esta se entrega líquida y al vaporizarse sobre la corriente de aire en el colector de admisión, los efectos de enfriamiento generan un aumento de la densidad y, por tanto, la cantidad de mezcla aire/combustible realmente aspirada

---

<sup>34</sup> S. Niranjana, S. Bibhuti, and S. Ujjwal, "Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines-A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 1151–1184, 2009

<sup>35</sup> A. G. Jorge, S. V. Fabio, and P. Sergio, "Comportamiento de un motor diesel de 1.105 hp operado mediante el sistema dual-fuel con diesel - gas natural en campos petroleros," *Inf. Técnico*, 2014, vol. 78 N °1, p. 12.

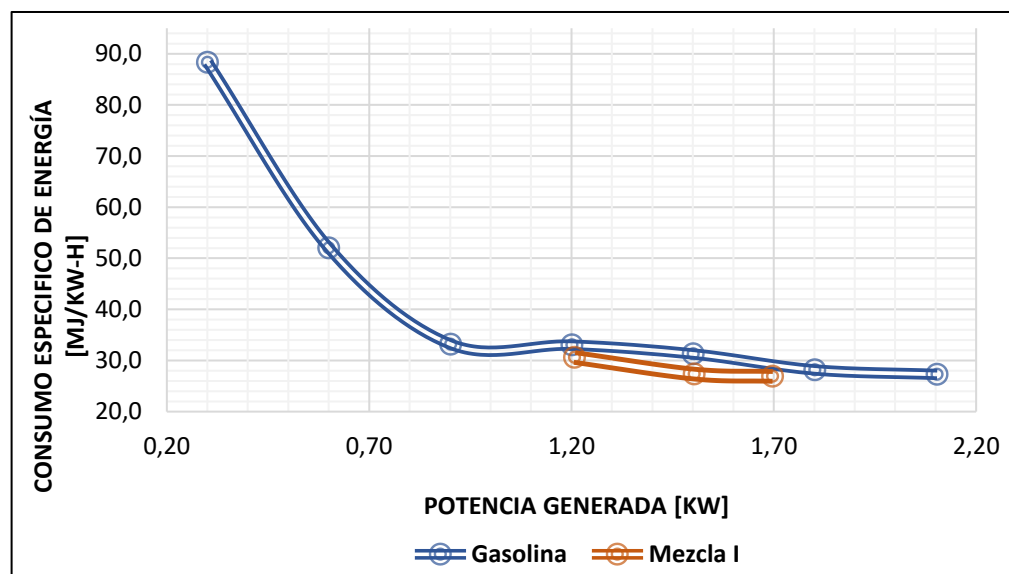
<sup>36</sup> *Ibid.*, p. 12.

por el motor ocupa un menor volumen, afectando en menor medida el desempeño del motor <sup>37</sup>.

Se realiza un análisis de los datos de la tabla 9 para cada mezcla y, se gráfica

- Mezcla I

**Gráfica 2.** Consumo específico de energía vs Potencia generada para la mezcla I

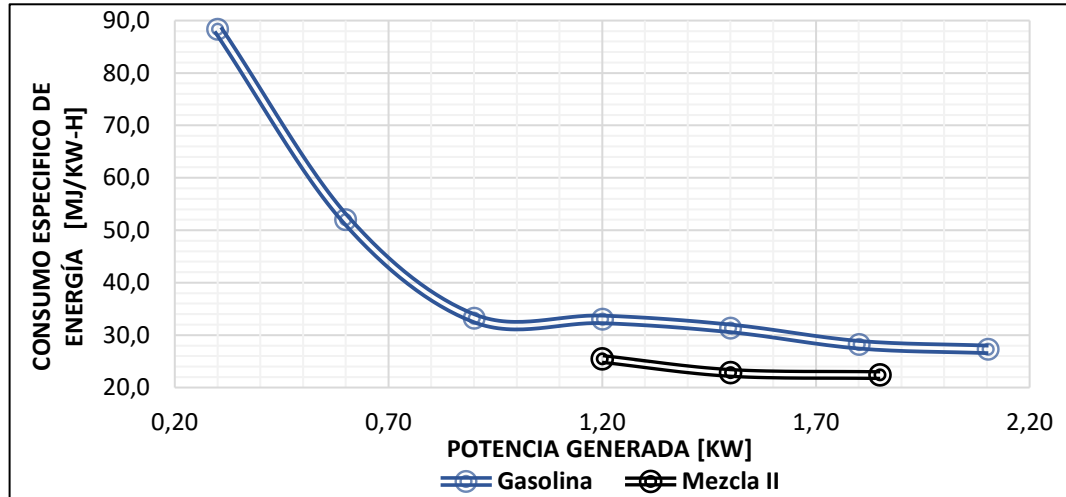


Se observa de la gráfica 1 que la potencia máxima generada con la mezcla I fue de 1,7 KW. Esto indica que el equipo alcanzó a trabajar al 70% de carga nominal. En esta prueba el sistema funcionó con aproximadamente 43% de gasolina y 57% biogás.

<sup>37</sup> S. Rodrigo, S. Fabio, and B. Adriano, "Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás," *Cienc. y Agrotecnologia*, 2010, vol. 34 No. 1, pp. 190–195.

- Mezcla II

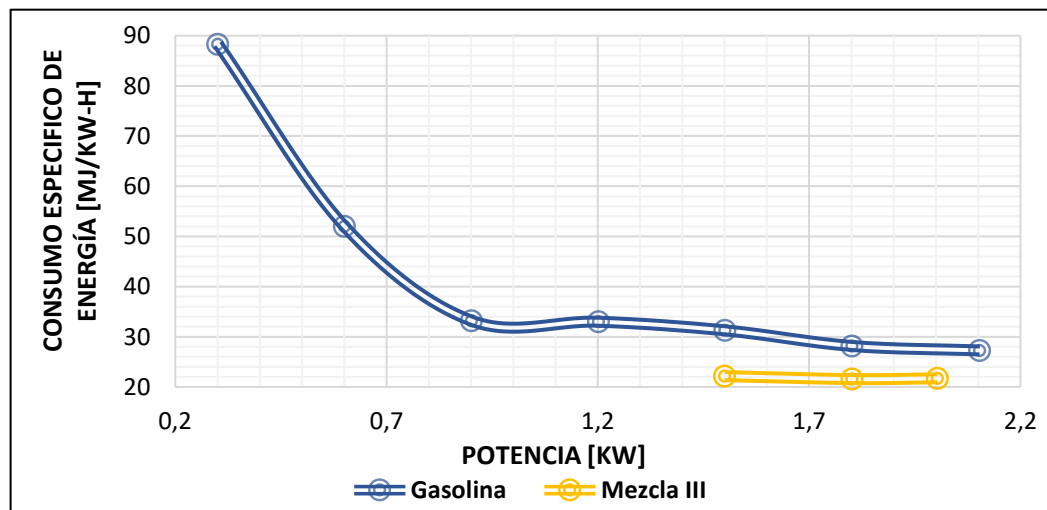
**Gráfica 3.** Consumo específico de energía vs Potencia generada para la mezcla II



En este caso, se observa que la potencia máxima generada con la mezcla II fue de 1,85 KW, lo cual corresponde al 77% de la carga nominal del equipo. En esta prueba el sistema operó con aproximadamente 63% de gasolina y 37% biogás.

- Mezcla III

**Gráfica 4.** Consumo específico de energía vs Potencia Generada para la mezcla III



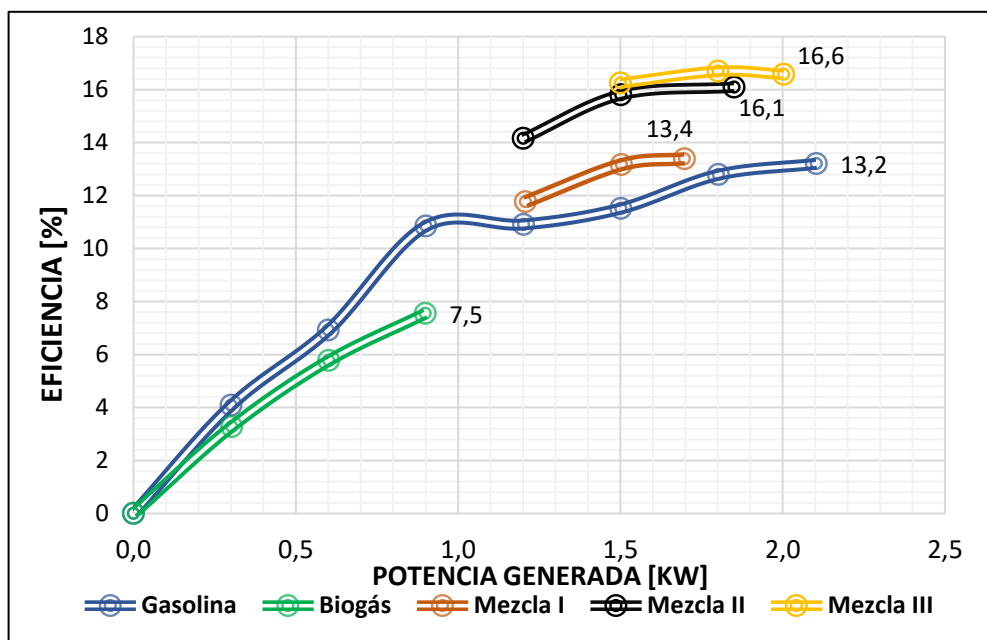


De la gráfica 4, se puede observar que la potencia máxima generada con la mezcla III fue de 2 KW. Esta corresponde al 83,3% de la carga nominal del equipo. En este punto el sistema funcionó con aproximadamente 70% de gasolina y 30% biogás. Finalmente, este ensayo nos permitió inferir que mezclas gasolina-biogás tienden a producir menos energía que en comparación con el combustible líquido fósil. La razón de este fenómeno es una disminución en la eficiencia volumétrica en la cámara de combustión <sup>38</sup>.

## 5.2 EFICIENCIA TOTAL

Los datos de eficiencia están en la tabla 9 y 10, los cuales están graficados en la gráfica 5. Los valores más altos de eficiencia de los grupos electrógenos se consiguen a un valor cercano a la potencia nominal del equipo. La máxima eficiencia que se consiguió producir con gasolina es de 13,2% a 2,1 KW y con biogás de 7,5% a 0,9 KW.

**Gráfica 5.** Eficiencia vs Potencia generada



<sup>38</sup> Ibid., pp. 190-195.

Cómo se puede observar en la gráfica 5 se presenta una mejoría en la eficiencia de la combustión cuando se utiliza las mezclas de combustible con respecto a la eficiencia lograda con utilizar solo gasolina, lo cual nos indica que el biogás mejora el proceso de la combustión.

La eficiencia máxima conseguida por la mezcla I fue de 13,4% a 1,7 KW, la cual aumentó aproximadamente 9,4% en comparación a la obtenida con gasolina a la misma potencia.

La eficiencia máxima conseguida por la mezcla II fue de 16,1% a 1,85 KW, la cual aumentó aproximadamente 29,86% en comparación a la obtenida con gasolina a la misma potencia.

La eficiencia máxima conseguida por la mezcla III fue de 16,7% a 1,8 KW, la cual aumento aproximadamente 34,68% en comparación a la obtenida con gasolina a la misma potencia.

La mezcla III registro un rendimiento de 16,6% a 2 KW la cual mejoró 33,7% en comparación a la obtenida con gasolina a la misma potencia.

A pesar de que el objetivo principal de un grupo electrógeno es la transformación de la energía química contenida en los combustibles en energía eléctrica, no toda esta se convierte efectivamente, debido a las diferentes corrientes de calor que salen del sistema al ambiente, las cuales constituyen las pérdidas energéticas del sistema. Una de estas corrientes de salida corresponde al potencial energético remanente que poseen aquellos compuestos que aún tienen un calor de combustión, tales como: CO, HC y otros <sup>39</sup>.

---

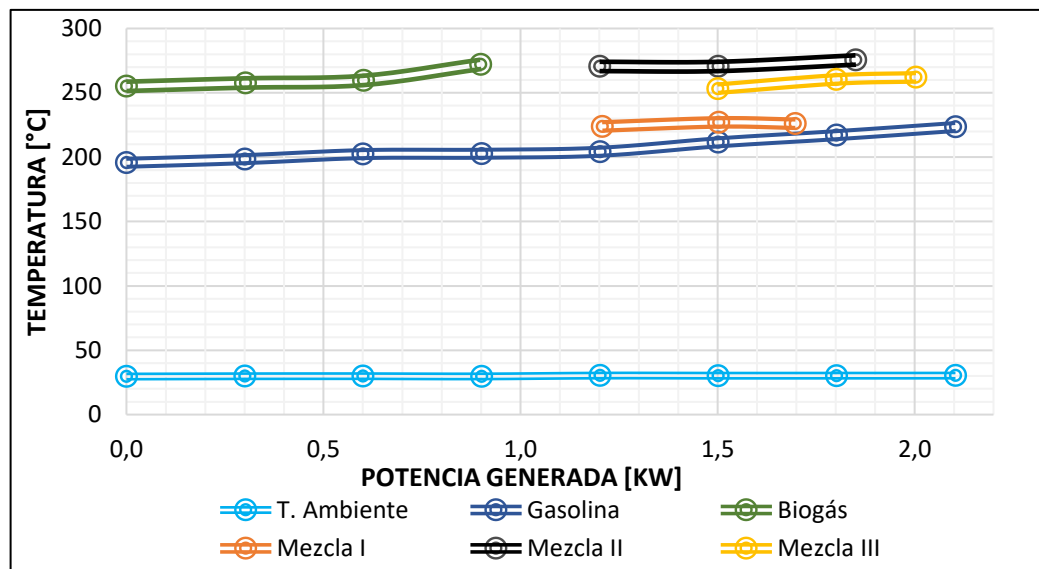
<sup>39</sup> F. Carlos, A. Jorge, and S. V. Fabio, "Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo," *Ing. Mecánica*, 2014, vol. 17 No 13, pp. 205–215.

Otra corriente de pérdida energética está relacionada con el calor sensible contenido en los gases de salida; equivalente a la energía empleada para lograr calentar todos los compuestos de los gases desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de salida <sup>40</sup>.

### 5.3 TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE

En la gráfica 6 se muestran el comportamiento de la temperatura ambiente y la temperatura de los gases de escape de cada combustible en función de la potencia generada.

**Gráfica 6.** Temperatura de los gases de escape vs Potencia generada



La temperatura de los gases que se producen de la combustión del biogás son aproximadamente 25% mayor a la que se genera al utilizar gasolina. Se observa en la gráfica 6 que en las mezclas se tiene una situación similar a la que se produce por el biogás en la temperatura de los gases de escape. Respecto a la humedad relativa durante el tiempo de ensayo, se presentaron algunos cambios durante la

<sup>40</sup> Ibid., pp. 205-215.

prueba; sin embargo, en general este parámetro estuvo aproximado a  $65 \pm 7\%$ . La presión atmosférica es de aproximadamente 90,35 KPa.

#### 5.4 EMISIONES DE ESCAPE

La emisión de contaminantes depende de la calidad del combustible, la tasa de consumo de combustible y el tipo de motor probado. Para ello, se realizó un análisis de los siguientes parámetros: Lambda ( $\lambda$ ), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Hidrocarburos no quemados (HC), Oxígeno (O<sub>2</sub>) y las RPM, los cuales son obtenidos mediante el analizador de Gases BrainBee.

Desde la tabla 11 a la 15 se presentan los valores de las emisiones de escape obtenidas de las pruebas para cada combustible:

**Tabla 11.** Emisiones generadas de la combustión de la gasolina

| Potencia Generada [KW] | $\lambda$ | CO [%V] | $\sigma$ (CO) | CO <sub>2</sub> [%V] | $\sigma$ (CO <sub>2</sub> ) | HC [ppm] | $\sigma$ (HC) | O <sub>2</sub> [%V] |
|------------------------|-----------|---------|---------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------|
| 2,1                    | 0,771     | 8,5     | 0,1           | 8,7                  | 0                           | 315,4    | 16,85         | 0,506               |
| 1,8                    | 0,785     | 8,0     | 0,03          | 9,0                  | 0,07                        | 315,4    | 4,22          | 0,510               |
| 1,5                    | 0,754     | 9,2     | 0,12          | 8,3                  | 0,12                        | 319,2    | 2,05          | 0,534               |
| 1,2                    | 0,763     | 8,9     | 0,07          | 8,4                  | 0,07                        | 335,8    | 1,3           | 0,600               |
| 0,9                    | 0,764     | 8,9     | 0,21          | 8,4                  | 0,7                         | 332,4    | 2,79          | 0,620               |
| 0,6                    | 0,776     | 8,5     | 0,05          | 8,6                  | 0                           | 332,4    | 12,76         | 0,658               |
| 0,3                    | 0,766     | 8,9     | 0,14          | 8,3                  | 0,08                        | 311,0    | 11,94         | 0,680               |
| 0,0                    | 0,765     | 9,0     | 0,04          | 8,2                  | 0                           | 313,4    | 6,19          | 0,750               |

**Tabla 12.** Emisiones generadas de la combustión del biogás

| Potencia generada [KW] | $\lambda$ | CO [%V] | $\sigma$ (CO) | CO <sub>2</sub> [%V] | $\sigma$ (CO <sub>2</sub> ) | HC [ppm] | $\sigma$ (HC) | O <sub>2</sub> [%V] |
|------------------------|-----------|---------|---------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------|
| 0,9                    | 1,1       | 0,3     | 0,02          | 15,0                 | 0,09                        | 126,4    | 13,3          | 2,7                 |
| 0,6                    | 1,1       | 0,2     | 0,01          | 14,8                 | 0,13                        | 108,2    | 7,6           | 3,1                 |
| 0,3                    | 1,1       | 0,1     | 0,01          | 14,7                 | 0,08                        | 95,6     | 3,6           | 3,3                 |
| 0,0                    | 1,1       | 0,1     | 0,02          | 14,9                 | 0,08                        | 94,2     | 8,9           | 2,8                 |

**Tabla 13.** Emisiones generadas de la combustión de la mezcla I

| Potencia generada [KW] | $\lambda$ | CO [%V] | $\sigma$ (CO) | CO <sub>2</sub> [%V] | $\sigma$ (CO <sub>2</sub> ) | HC [ppm] | $\sigma$ (HC) | O <sub>2</sub> [%V] |
|------------------------|-----------|---------|---------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------|
| 1,70                   | 1,02      | 0,8     | 0,01          | 14,70                | 0                           | 120,25   | 4,50          | 0,94                |
| 1,50                   | 1,09      | 0,6     | 0,04          | 13,80                | 0                           | 94,00    | 3,81          | 2,40                |
| 1,20                   | 1,11      | 0,8     | 0,11          | 13,24                | 0,06                        | 81,20    | 3,11          | 2,94                |

**Tabla 14.** Emisiones generadas de la combustión de la mezcla II

| Potencia generada [KW] | $\lambda$ | CO [%V] | $\sigma$ (CO) | CO <sub>2</sub> [%V] | $\sigma$ (CO <sub>2</sub> ) | HC [ppm] | $\sigma$ (HC) | O <sub>2</sub> [%V] |
|------------------------|-----------|---------|---------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------|
| 1,85                   | 1,01      | 0,8     | 0,09          | 13,60                | 0,00                        | 148,00   | 1,73          | 0,92                |
| 1,50                   | 1,07      | 0,2     | 0,19          | 13,40                | 0,10                        | 108,80   | 2,59          | 1,56                |
| 1,20                   | 1,07      | 0,2     | 0,19          | 13,30                | 0,00                        | 94,00    | 2,00          | 1,69                |

**Tabla 15.** Emisiones generadas de la combustión de la mezcla III

| Potencia generada [KW] | $\lambda$ | CO [%V] | $\sigma$ (CO) | CO <sub>2</sub> [%V] | $\sigma$ (CO <sub>2</sub> ) | HC [ppm] | $\sigma$ (HC) | O <sub>2</sub> [%V] |
|------------------------|-----------|---------|---------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------|
| 2,0                    | 1,03      | 0,7     | 0,26          | 13,06                | 0,11                        | 153,20   | 16,93         | 1,09                |
| 1,8                    | 1,05      | 0,4     | 0,14          | 12,98                | 0,13                        | 131,50   | 7,19          | 1,32                |
| 1,5                    | 1,11      | 0,1     | 0,01          | 12,60                | 0,00                        | 91,00    | 3,74          | 2,25                |

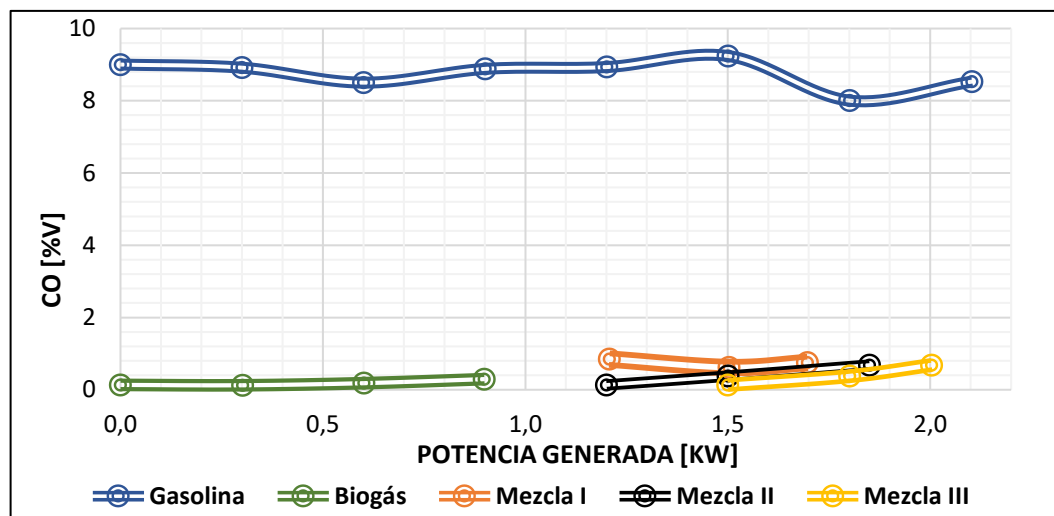
Cómo se observó el factor lambda de la gasolina es muy inferior a uno, lo cual con lleva a que la combustión se encuentre combustible en exceso (mezcla rica), y produzca grandes concentraciones de gases de efecto invernadero.

Se observó que al utilizar biogás o las mezclas biogás/gasolina el factor lambda es mayor a uno, esté influye directamente en la disminución de producción de gases de efecto invernadero. Lo cual se debe a que la mezcla del combustible y el aire es más homogénea ya que ambos son gases.

A continuación, se presentan las gráficas y análisis que muestran el cambio en las emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC cuando varían las condiciones de potencia generada.

**5.4.1 Monóxido de Carbono (CO).** En la gráfica 7 se observa el comportamiento del CO obtenido de cada combustible en función de la potencia generada.

**Gráfica 7.** Monóxido de Carbono (%V) vs Potencia generada



Se observa de la gráfica 7 que se tiene una ventaja al utilizar biogás como combustible, gracias a que contribuye a la disminución de CO, con respecto a solo utilizar gasolina en todos los niveles de carga como se puede observar en la gráfica, cuando se requiere una potencia de 0,9 KW la disminución de este gas nocivo es de aproximadamente 96,6% con respecto a utilizar gasolina.

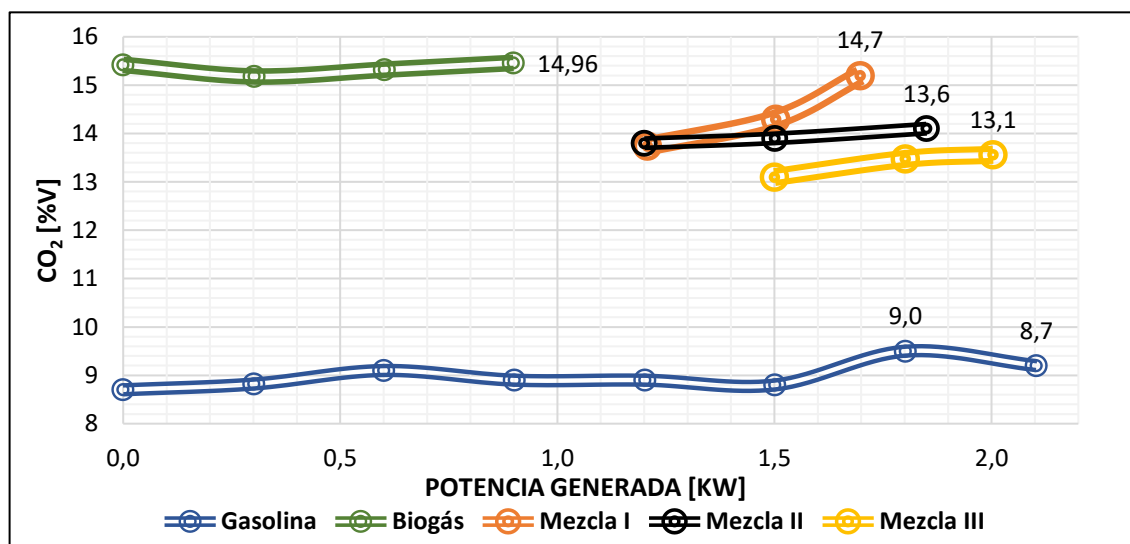
En términos generales la producción de Monóxido de Carbono de las mezclas disminuyó un 90% con respecto a la gasolina, lo cual es de gran importancia debido a que el CO el cual, es un gas tóxico, resultado de una combustión incompleta, lo cual indica que se logra el objetivo de reducir la emisión de este gas al medio ambiente con la adecuación del motor dual <sup>41</sup>.

<sup>41</sup> E. Cerdá, "Energía obtenida a partir de biomasa," *Cuad. Económicos ICE*, 2014, no. 83, pp. 117-140.

El CO es el resultado de la oxidación incompleta del carbono durante el proceso de combustión, es un gas tóxico, inodoro, incoloro e insípido y tiene serias implicaciones en la salud humana <sup>42</sup>.

**5.4.3 Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).** En la gráfica 8 se observa el comportamiento del CO<sub>2</sub> obtenido de cada combustible en función de la potencia generada.

**Gráfica 8.** Dióxido de Carbono (%V) vs Potencia generada



Se puede observar en la gráfica 8 que la cantidad de CO<sub>2</sub> que se produjo con biogás es aproximadamente 75% mayor a la producida con gasolina, lo cual representa que está ocurriendo una mejor combustión.

El Dióxido de Carbono producido por la mezcla I fue de 14,7 (%V) a 1,7 KW, la cual aumentó aproximadamente 70,2% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

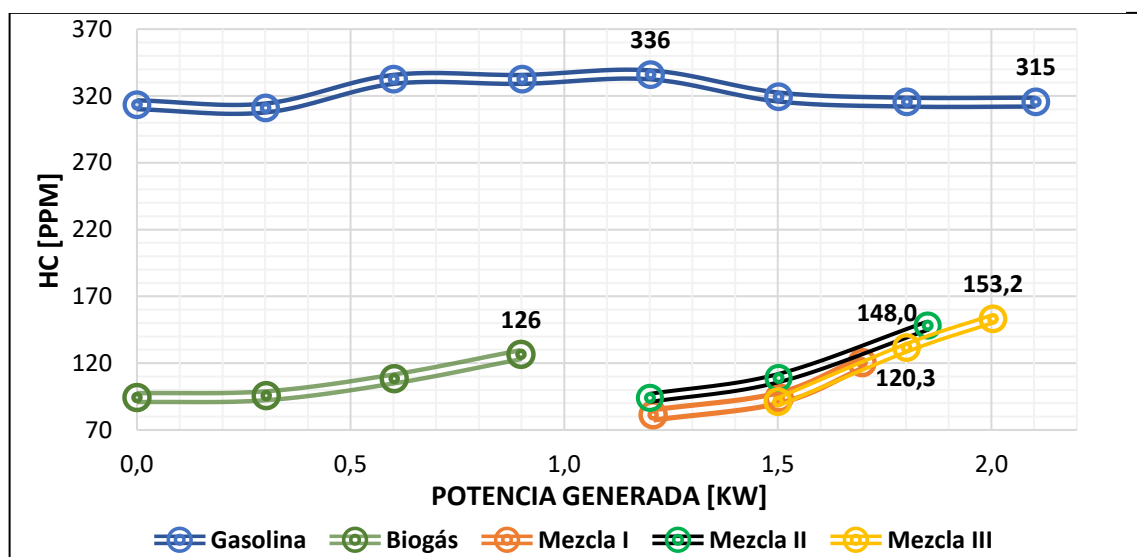
<sup>42</sup> S. C. Yamid and R. P. Carlos, "Comparative theoretical study of thermodynamics characteristics of performance of a combustion engine operating with gasoline and with natural gas.," *Sci. Tech. Año XV*, 2009, vol. 1 No °1, pp. 99–104.

El Dióxido de Carbono producido por la mezcla II fue de 13,6 (%V) a 1,85 KW, la cual aumentó aproximadamente 48,2% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

El Dióxido de Carbono producido por la mezcla III fue de 13,1 (%V) a 2 KW, la cual aumento aproximadamente 39,4% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

**5.4.3 Hidrocarburos no quemados (HC).** En la gráfica 9 se observa el comportamiento del HC obtenido de cada combustible en función de la potencia generada.

**Gráfica 9.** Hidrocarburos no quemados (ppm) vs Potencia generada



Se puede observar en la gráfica 9 que cuándo se producen 900 W de potencia se observa que la disminución de HC producidos con biogás es de 62% menor con respecto utilizar gasolina



Los HC producido por la mezcla I fueron de 148 (ppm) a 1,7 KW, la cual disminuyó aproximadamente 61,4% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

Los HC producido por la mezcla II fueron de 126 (ppm) a 1,85 KW, la cual disminuyó aproximadamente 53,4% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

Los HC producido por la mezcla III fueron de 153,2 (ppm) a 2 KW, la cual disminuyó aproximadamente 52,9% en comparación al valor obtenido con gasolina a la misma potencia.

Los HC son restos no quemados del combustible, que surgen en los gases de escape después de una combustión incompleta. La mala combustión puede ser debido a la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica) o también por una baja velocidad de inflamación (mezcla pobre).

## 6. VIABILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICA

El esfuerzo global para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) implica sustituir los combustibles fósiles con combustibles renovables y mejorar la eficiencia de la utilización de la energía, la biomasa es el recurso renovable más grande o el segundo más grande junto a la energía hidroeléctrica. Por lo tanto, existe un creciente interés en desarrollar y comercializar tecnologías innovadoras de conversión de energía de biomasa <sup>43</sup>.

El costo de la inversión para desarrollar esta propuesta encierra el producto de los costos directos e indirectos, para al final obtener el costo total de la inversión en el sistema de uso de gasolina-biogás como combustible en un generador eléctrico rural.

Al utilizar energías alternas para convertirlas en energía eléctrica también tiene un beneficio social, cuya importancia genera un impacto de gran relevancia. Para ello dentro del análisis de costo-beneficio de la tabla 16, existen varias técnicas de medición de impacto que facilitan la medición de proyectos destinados a beneficio social, investigativo e innovación, se utilizó la técnica ACE de Walter Hillermann, la cual mide el cumplimiento de los objetivos que no se pueden valorar en moneda a partir de la evaluación, con la eficacia y eficiencia en el logro de aquellos. La medida de la eficacia es el impacto.

---

<sup>43</sup> B. Suresh, "Perspectives on Biomass Gasification," *Int. Energy Agency*, 2006, p. 46.

**Tabla 16.** Matriz de relación beneficio-impacto

| Medición                                        | Lo que se mide                                             | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Objetivo/ la investigación                      | Efecto                                                     | <u>Beneficios</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de energía eléctrica.</li> <li>• Reducción de gastos energéticos para las poblaciones rurales de Colombia.</li> <li>• El biogás satisface la necesidad de combustible.</li> </ul>                                                                                                                                     |
| Objetivo de desarrollo e innovación tecnológica | Impacto                                                    | <u>Cambios sostenibles alcanzados en la situación de los beneficiarios.</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impactos en la atmósfera al prescindir de energía eléctrica proveniente de las termoeléctricas.</li> <li>• Generación de energía limpia y cultura de protección ambiental.</li> <li>• Desarrollo rural promoviendo un óptimo manejo de desechos orgánicos.</li> </ul> |
| Resultados                                      | Potencia, consumo de combustible, lambda y gases de escape | <u>Actividades</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptación del carburador del motor.</li> <li>• Circuito de alimentación del biogás.</li> <li>• Funcionamiento general del sistema.</li> <li>• Medición de resultados de la prueba</li> </ul>                                                                                                                                  |

Fuente: <sup>44</sup>

## 6.1 COSTO DE LOS COMBUSTIBLES

**6.1.2 Costo de la gasolina.** El costo de la gasolina se obtuvo del sitio web Gas y Energía el día 20 de mayo de 2019, el cual es de CV\_gasolina= 8.834 (\$COP /Galón) <sup>45</sup>.

**6.1.3 Costo del biogás.** Para calcular el costo del biogás se debe considerar la actividad económica de la finca. La principal actividad de la propiedad es la crianza de gallinas ponedoras. Además de ésta, son realizadas otras actividades agrícolas, tales como el cultivo de café, crianza de cerdos con 3 animales en fase de

<sup>44</sup> B. Freddy, "Desarrollo, construcción y pruebas de un sistema de uso de biogás como combustible en un moto generador eléctrico rural," Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 2013.

<sup>45</sup> ACIEM, "Canasta Energética," *Gas y Energía*, 2019. [Online]. Available: <http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>. [Accessed: 20-May-2019].

crecimiento y terminación, y crianza de 8 bovinos. Los digestores (dos) que producen el biogás están en serie, tienen forma tubular de polietileno, operación continua, es hermético e impermeable, el gas se almacena en un reservorio del mismo material que el digestor de aproximadamente 3,5 m<sup>3</sup> de capacidad. Las dimensiones en general son; 17 metros de largo y 1,5 metros de diámetro.

Los productos de la digestión anaerobia son el biogás y el efluente líquido. El efluente es una solución orgánica estabilizada que tiene valor como fertilizante y por ello puede ser utilizado en irrigación de pastos y cultivos <sup>46</sup>.

**6.1.3.1 Producción de biogás.** Para el ganado vacuno, el tiempo de estación es de doce horas por día aproximadamente, lo cual implica que solo 50% de las excretas se puede recuperar, mientras que, para el porcino es de 100%, dando como resultado un eficaz método de recolección de excretas. En la tabla 17 se observa los valores de producción de biogás.

**Tabla 17.** Producción promedio de estiércol de acuerdo con el tiempo de estación

|         | Producción de excretas por día Bovino [kg/día] | Producción Biogás [m <sup>3</sup> /animal día] | Producción de excretas por día Porcino [kg/día] | Producción Biogás [m <sup>3</sup> /animal día] |
|---------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Grande  | 15                                             | 0,6                                            | 2                                               | 0,14                                           |
| Mediano | 10                                             | 0,4                                            | 1,5                                             | 0,1                                            |

Fuente: <sup>47</sup>

Según la tabla anterior se produce aproximadamente 2,5 m<sup>3</sup>/día de biogás, al año sería 912,5 m<sup>3</sup>/año.

<sup>46</sup> S. Juan, "Tecnología del Biogas," *Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales*. Cali, 2002, p. 9.

<sup>47</sup> M. A. Laura and R. A. Andres, "Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino en la finca Marcella," Universidad Industrial de Santander, 2016.

Los costos fueron estimados considerando los costos fijos oriundos de la inversión inicial (clasificada como el gasto necesario para la implantación de las instalaciones y adquisiciones de los materiales y equipamientos) y de los costos variables de mantenimiento del sistema, para un tiempo de vida de 5 años. Estos datos fueron colectados en la propiedad, y en algunos casos, fueron realizadas cotizaciones de mercado (véase la tabla 18).

**Tabla 18.** Costos de instalación del biogás

| Concepto                   | Valor \$ COP        |
|----------------------------|---------------------|
| Plástico digestor          | 400,000             |
| Membrana de almacenamiento | 60,000              |
| Excavación                 | 100,000             |
| Varios                     | 70,000              |
| Mantenimiento              | 400,000             |
| <b>TOTAL</b>               | <b>\$ 1'030,000</b> |

Para calcular el costo del biogás se estimó los costos con la producción de gas en 5 años;

$$CV_{\text{biogás}} = \frac{1'030,000}{5 * 912,5} = 225,78 (\$ \text{ COP/m}^3)$$

## 6.2 IMPLEMETOS PARA PRODUCIR ENERGÍA

De manera general, para los sistemas de generación de energía eléctrica se agruparán los costos de producción en dos grandes componentes:

- Costos de Inversión: comprende los que hacen referencia a la compra, instalación y puesta en funcionamiento del sistema de generación.
- Costos de administración, operación y mantenimiento: en este rubro se agrupan todos aquellos costos asociados a la actividad de producción de energía eléctrica, excepto los costos de combustible y lubricantes. Incluyen todas las

actividades que se requieren para garantizar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de las máquinas.

En la tabla 19 esta descrito los costos de los implementos que se utilizan para producir energía.

**Tabla 19.** Costos de los implementos de las pruebas

| Implementos                  | Costos (\$ COP) |
|------------------------------|-----------------|
| Grupo electrógeno            | 1'250.000       |
| Transporte y montaje         | 100.000         |
| Mantenimiento                | 350.000         |
| Asesoría externa profesional | 300.000         |
| TOTAL                        | 2'000.000       |

### 6.3 COSTO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA (KW)

Los beneficios fueron estimados a partir de la producción de energía eléctrica generada en el sistema, en cargas superiores al 70% de la nominal del equipo, para obtener el mayor beneficio posible. Para los cuales no se tuvo en cuenta los costos de los implementos ya que serían igual para la gasolina que para las mezclas biogás/gasolina.

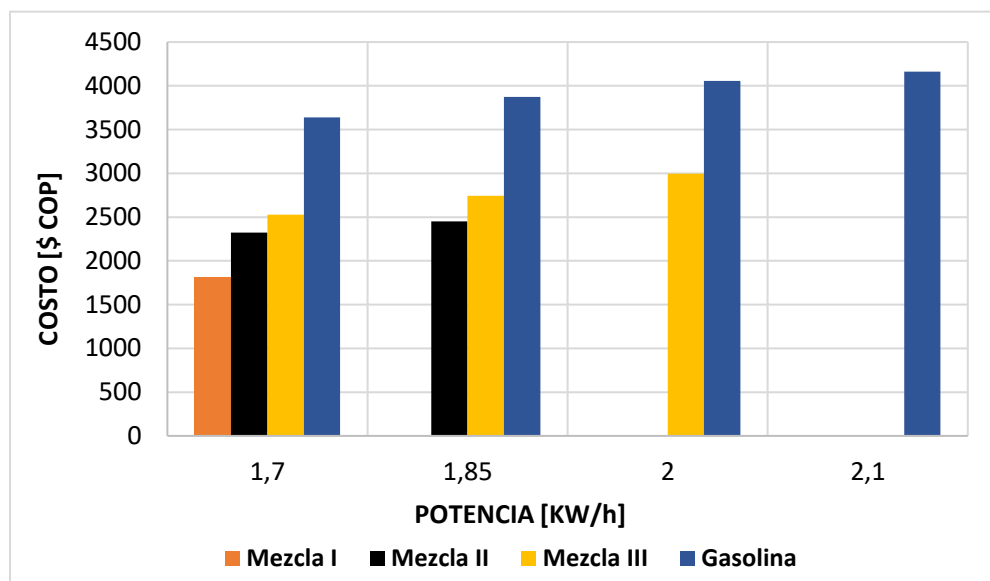
La valoración económica se realizó teniendo en cuenta los costos de los fluidos de trabajo, básicamente se comparan los costos de producción de un kilovatio hora (KW-h) de energía eléctrica operando la planta con gasolina y con las mezclas (biogás/gasolina). Los costos de producir energía eléctrica se muestran en la tabla 20.

**Tabla 20.** Costos de producir energía con cada combustible

| POTENCIA<br>GENERADA<br>[KW-h] | GASOLINA        |                | MEZCLA I        |                         |                | MEZCLA II       |                         |                | MEZCLA III      |                         |                |
|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|----------------|
|                                | $\dot{m}$ [g/h] | COSTO [\$ COP] | $\dot{m}$ [g/h] | $V$ [m <sup>3</sup> /h] | COSTO [\$ COP] | $\dot{m}$ [g/h] | $V$ [m <sup>3</sup> /h] | COSTO [\$ COP] | $\dot{m}$ [g/h] | $V$ [m <sup>3</sup> /h] | COSTO [\$ COP] |
| 2,1                            | 1076,0          | 3638,0         |                 |                         |                |                 |                         |                |                 |                         |                |
| 2,0                            | 1145,0          | 3871,3         |                 |                         |                |                 |                         |                |                 |                         |                |
| 1,9                            | 1199,0          | 4053,9         |                 |                         |                |                 |                         |                |                 |                         |                |
| 1,7                            | 1231,2          | 4162,6         | 455,0           | 1,221                   | 1814,1         | 663,1           | 0,351                   | 2321,2         | 739,5           | 0,116                   | 2526,5         |

Según los datos de la tabla anterior se realizó la gráfica 10 para observar como varían los costos según el combustible:

**Gráfica 10.** Costos de producir energía con cada mezcla.



Como se aprecia en la gráfica 10 se reducen los costos utilizando alguna de las mezclas biogás/gasolina que, con respecto a solo utilizar gasolina.

Para producir 1,7 KW de potencia se ahorra en costos de combustible el 56% si se utiliza la mezcla I con respecto al combustible tradicional, el 44% si es la mezcla II y el 38% si es la mezcla III.

Se observó que para producir 1,85 KW de potencia se ahorra en costos de combustible el 39,5% si se utiliza la mezcla II con respecto al combustible tradicional y el 32% si es la mezcla III.

Se puede observar que para producir 2 KW de potencia se ahorra en costos de combustible el 22,6% si se utiliza la mezcla III con respecto al combustible tradicional.

Pero no se consigue obtener la potencia máxima alcanzada con gasolina que es de 2,1 KW. Se lograría mejores resultados si la calidad del biogás fuera más alta, pero se incurriría en los costos de realizar este proceso.

#### 6.4 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES

Las emisiones de escape de los vehículos se miden normalmente con un analizador de gases y se informan en partes por millón (ppm) y porcentaje de volumen (% en volumen). Es importante comparar estas emisiones con las normas europeas para la industria automotriz, que generalmente se reportan en g/kWh (Heseding y Daskalopoulos, 2006) <sup>48</sup>.

Esta relación está definida por la siguiente ecuación:

$$EP_{i,d} (g / kWh) = \frac{EV_{i,d} (ppm)}{1 \times 10^6} \times \left( \frac{M_i}{30.21 g/mol} \times 3873 g/kWh \right)$$

Donde:

$EP_i$ : Masa contaminante (g/kWh).

---

<sup>48</sup> P. TSIETSI, M. Mansoor, and M. Edinson, "Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 12, pp. 994–1006, 2012.



$EV_{i,d}$ : Valor de emisión de escape de los componentes en base seca, i, como volumen compartido (ppm).

$M_i$ : Masa molecular de los componentes, i, (g/mol).

Para determinar las relaciones de masa molecular de HC se utilizó las siguientes definiciones:

$$M_{HC\_gasolina}: C_7H_{17} = 12,01 \cdot 7 + 17 \cdot 1.007 = 101,213 \text{ (g/mol)}$$

$$M_{HC\_biogás}: CH_4 = 12,01 \cdot 1 + 17 \cdot 1.007 = 16.04 \text{ (g/mol)}$$

$$M_{i\_mezclas}: Y_{biogas}(CH_4) + Y_{gasolina}(C_7H_{17}), \text{ donde } Y_{biogas} + Y_{gasolina} = 1$$

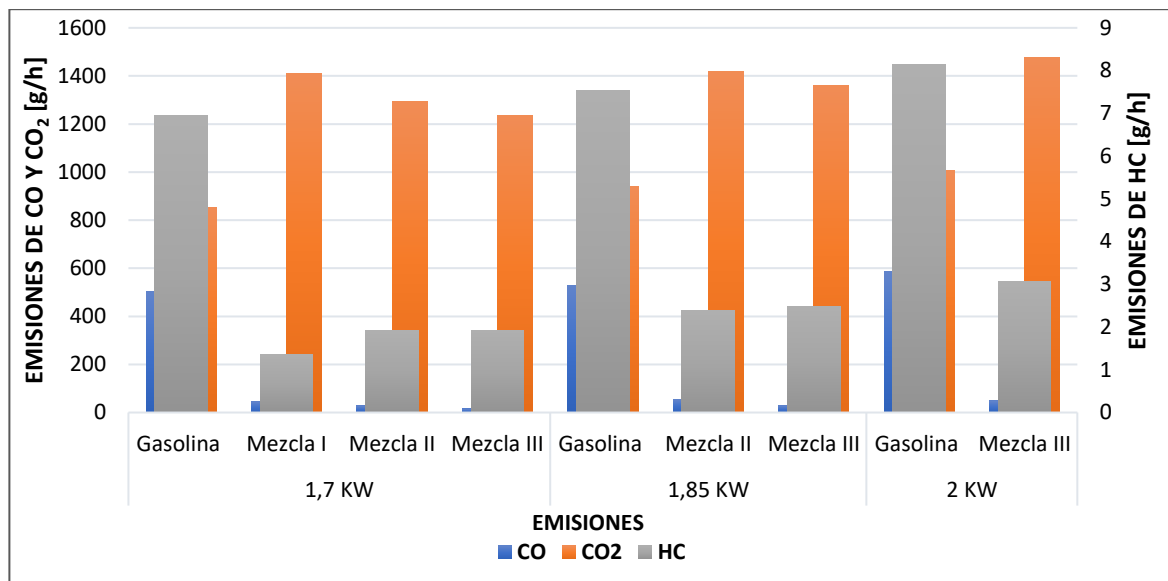
Para analizar la cantidad en gr/h de CO, CO<sub>2</sub> y HC que se dejan de producir si se realiza la mezcla biogás/gasolina en tres rangos de potencia (1,7- 1,85 y 2 KW), se utilizó la ecuación anterior. Estos resultados se presentan se muestran en la tabla 21.

**Tabla 21.** Emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC en g/h para tres rangos de potencia

| Potencia        | 1,7 KW   |          |           |            | 1,85 KW  |           |            | 2 KW     |            |
|-----------------|----------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|------------|
| Emisiones (g/h) | Gasolina | Mezcla I | Mezcla II | Mezcla III | Gasolina | Mezcla II | Mezcla III | Gasolina | Mezcla III |
| CO              | 501,84   | 46,325   | 28,934    | 16,3455    | 529,1    | 55,3335   | 29,341     | 585      | 48,74      |
| CO <sub>2</sub> | 851,19   | 1411,7   | 1295,23   | 1237,26    | 941,465  | 1419,51   | 1360,9     | 1006,2   | 1478,2     |
| HC              | 6,9547   | 1,3673   | 1,9193    | 1,9295     | 7,5406   | 2,37725   | 2,4698     | 8,146    | 3,068      |

Los valores de la tabla 21 se representaron en la gráfica 11, para su posterior análisis.

**Gráfica 11.** Emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC en g/h vs la potencia generada (1,7-1,85 y 2 KW)



**6.4.1 Emisiones de CO.** Para producir 1,7 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (I, II o III) se consiguió disminuir en más del 90% la producción de CO, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 501,84 g/h.

Para producir 1,85 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (II o III) se consiguió disminuir en más del 89,5% la producción de CO, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 529 g/h.

Para producir 2 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla III se consiguió disminuir en 91,6% la producción de CO, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 585 g/KW-h.

**6.4.2 Emisiones de CO<sub>2</sub>.** Para producir 1,7 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (I, II o III) se consiguió aumentar en más del 45,3% la producción de CO<sub>2</sub>, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 851,2 g/ h.

Para producir 1,85 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (II o III) se consiguió aumentar en más del 44,4% la producción de CO<sub>2</sub>, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 941,46 g/KW-h.

Para producir 2 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla III se consiguió aumentar en 46,9% la producción de CO<sub>2</sub>, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 1006,2 g/h.

**6.4.3 Emisiones de HC.** Para producir 1,7 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (I, II o III) se consiguió disminuir en más del 72,2% la producción de HC, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 6,9 g/h. Para producir 1,85 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla (II o III) se consiguió disminuir en más del 67,2% la producción de HC, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 7,54 g/KW-h.

Para producir 2 KW-h de energía utilizando como combustible la mezcla III se consiguió disminuir en 62,3% la producción de HC, con respecto al que produce con gasolina el cual es de 8,14 g/h.

A través de todo este proyecto se evidencia el beneficio social, económico y ambiental que se consigue al mezclar un combustible fósil (gasolina) y uno de energías renovables (biogás). Lo cual es de gran importancia en Colombia ya que se hace necesario generar nuevas tecnologías a los MCI.

Debido a los problemas ambientales y sociales que están viviendo ciudades como Medellín, Bogotá D.C entre otras de Colombia, ya que los niveles de gases contaminantes son altos <sup>49</sup>. La situación se está volviendo preocupante cuando se observan los datos del 2018, puesto que se vendieron 256.662 vehículos, el mercado se incrementó un 7,7% con respecto al 2017, según reportó la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores.

En este proyecto se propone utilizar un combustible convencional mezclado con uno renovable, lo cual aportaría de manera significativa en la disminución de los gases de efecto invernadero producto de la combustión, teniendo en cuenta lo que sea dicho anteriormente, se deben cumplir ciertos objetivos:

- Económico: satisfacer las necesidades de movilidad y producción de energía para el cumplimiento de la actividad económica.
- Social: que los ciudadanos tengan la accesibilidad de poder utilizar sus servicios de transporte y energía más respetuosos con el medio ambiente.
- Medioambiental: cumplir con la protección del medio ambiente, la salud de los ciudadanos y de los animales.
- Reducir los efectos de GEI para cumplir los objetivos nacionales redactados en el Protocolo de Kioto.
- Mejorar la calidad del aire en el ámbito urbano, y reducir la concentración de los contaminantes atmosféricos y evitar la superación de los estándares del ruido <sup>50</sup>.
- Promover la utilización de energías renovables.

---

<sup>49</sup> Semana, "La salud de Bogotá y Medellín: lo que está en juego por las crisis ambientales," *Revista Semana*, 2019. [Online]. Available: <https://www.semana.com/nacion/articulo/bogota-y-medellin-dos-ciudades-con-la-salud-en-juego-por-las-crisis-ambientales/607600>. [Accessed: 05-Aug-2019].

<sup>50</sup> V. Adrian, "Simulación CFD sistema de combustible Dual-Fuel en MCI," Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2016.

## CONCLUSIONES

- El protocolo de pruebas realizado consideró 8 niveles de carga, en términos de potencia eléctrica generada, tres mezclas más el modo de operación gasolina original, y el régimen de giro del motor constante es de 3600 RPM, puesto que se trata de un generador de frecuencia 60 Hz. Con ello se obtuvieron los datos de potencia generada, consumo de combustible y emisiones, a condiciones atmosféricas.
- Las modificaciones realizadas a los 3 chicleros (0,3 – 0,4 y 0,5 mm) permitieron realizar las pruebas para mezclar gasolina-biogás, como se observa en la variación sobre los datos obtenidos experimentalmente, sin presentar ninguna alteración sobre el sistema de admisión original.
- El uso de biogás como combustible mejora las emisiones de los gases de escape con respecto a las producidos con gasolina puesto que reduce el CO en 95%, aumenta el CO<sub>2</sub> en un 70% y disminuyen los HC en un 30%. Pero la potencia máxima alcanzada equivale al 42,3% de la generada con el combustible tradicional.
- El consumo en masa por unidad de tiempo de combustible es mayor para el biogás debido a su poder calorífico, pero es una fuente de energía renovable cuya producción es sostenible, lo cual lo convierte en un biocombustible altamente viable en la aplicación de MCI para diversos fines.
- Se evidencia que es factible trabajar con un MCI de encendido por chispa (ICH), al usar mezclas de gasolina-biogás con los inconvenientes propios encontrados a través del desarrollo de la presente tesis. Se mejora el proceso de combustión alcanzando una eficiencia de 16,5%, y la reducción de los gases efecto invernadero es significativa con respecto a utilizar gasolina, generando un gran impacto social y ambiental sin realizar grandes modificaciones a los equipos que utilizan combustibles fósiles.

- Usar mezclas de biogás-gasolina para producir energía eléctrica permite reducir los costos significativamente con respecto a utilizar el combustible tradicional (gasolina), para generar 2 KW se redujo en más del 22%, y a medida que se aleja de la potencia nominal aumenta el ahorro de dinero, pero sin olvidar las restricciones de potencia que se pueden obtener de las mezclas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Asociación Colombiana del Petróleo. Sector minero y petrolero en Colombia. [En línea] 2010. [Citado el: 20 del 11 de 2018] <https://mail.google.com/mail/u/0/?shva=1#inbox/14295e2ef73ace4a>.

Aponte, Juan. UPME. Unidad de Planeación Minero-Energética. Proyección de Demanda Energética en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. 2013.

Arango, Jorge Eduardo. Pruebas de motores de combustión interna en el laboratorio de motores. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2004.

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.

Colome, José. Grupos Electrógenos, Publicaciones Marcombo, Barcelona, España, 1987.

Cummins Power Generation, Manual de aplicación: Generadores enfriados por líquido, 2007.

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.

Fabio E. Sierra. Tecnologías para el Aprovechamiento de los Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2008.

Fao. Manual de Biogás. Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables Chile. 2011.

FERGUSON C. R, Internal Combustion Engines. New York: Wiley, 1986.

J. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, 1 ed., 1988.

ISO 3046-1: 1995, Reciprocating Internal combustion engines – Performance – Part I: Estándar reference conditions, declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods.

ISO 8528-2: 1993, Reciprocating Internal combustion engine driven alternating current generating sets- Part 3: Alternating current generators for generating sets.

Lister - tecquipment. Engine test equipment & instrumentation, Manual de referencia pruebas y análisis.

Mantilla Jorge, Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible. Universidad Nacional de Colombia. Redalyc. 2008

"Methanol/Gasoline Blends and Emissions," Automotive Engineering, vol. 100, no. 5, pp. 17-19, 1992, SAE International.

NTC 5375, Revisión Técnico-Mecánica y de emisiones contaminantes en vehículos automotores.

Obert, Edward, Motores de combustión Interna Alternativos, Universidad de Wisconsin México, 1992.



SDMO, Manual de uso y mantenimiento de los grupos electrógenos, 2010.

Silva, Vladimir. Análisis Exploratorio de Investigaciones sobre los Motores de Combustión Interna que Funcionan con Biogás, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia 2012.

TAYLOR, C. F., The Internal Combustion Engine in Theory and Practice. Cambridge, MA: M.I.T. Press, 1977.

"The Changing Nature of Gasoline," Automotive Engineering, vol. 102, no. 1, pp. 99-102, 1994, SAE International.

UNE-EN 61010-1, Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales.

UL 3111-1, Electrical Measuring and Test Equipment - Part 1: General Requirements

V. Adrian, "Simulación CFD sistema de combustible Dual-Fuel en MCI," Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2016.

