

**REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN DE  
BIODIESEL POR FUEL OIL LIGHT No.4**

**ANDREA DEL PILAR VILLAMIL BUITRAGO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN DE  
BIODIESEL POR FUEL OIL LIGHT No.4**

**ANDREA DEL PILAR VILLAMIL BUITRAGO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en Producción de Hidrocarburos.**

**DIRECTOR**

**SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO**

**Ingeniero de Petróleos, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

A Dios por la oportunidad y guía,  
A mi madre por paciencia y amor,  
A mis hermanos por su apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por la oportunidad de poder realizar este estudio y poder disponer de los medios para hacerlo. Al director de la monografía quien proporciono valiosos aportes, y a la Universidad Industrial de Santander, los cuales pusieron su disposición y todos los recursos, para la culminación de esta especialización.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....                               | 18 |
| 1. CONCEPTOS PRELIMINARES.....                   | 19 |
| 1.1 COMBUSTIBLES Y BIOCOMBUSTIBLES .....         | 19 |
| 1.2 BIODIÉSEL .....                              | 20 |
| 1.3 PROPIEDADES DE BIODIÉSEL.....                | 21 |
| 1.3.1 Punto de Inflamación ("flash point") ..... | 22 |
| 1.3.2 Viscosidad cinemática .....                | 22 |
| 1.3.3 Densidad.....                              | 22 |
| 1.3.4 Numero Cetano.....                         | 23 |
| 1.3.5 Poder calorífico superior .....            | 23 |
| 1.3.6 Índice de yodo.....                        | 23 |
| 1.3.7 Punto de nube.....                         | 24 |
| 1.3.8 Lubricidad .....                           | 24 |
| 1.3.9 Estabilidad oxidativa .....                | 24 |
| 1.3.10 Punto de gota.....                        | 25 |
| 1.3.11 Viscosidad absoluta .....                 | 25 |
| 1.4 DESTILADOS Y RESIDUOS.....                   | 26 |

|   |    |
|---|----|
| 2. NORMATIVIDAD APLICABLE PARA EL USO DE LOS COMBUSTIBLES EN LA GENERACION DEL CAMPO DE ESTUDIO.....                  | 27 |
| 2.1 NORMA COLOMBIANA EN ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES PARA MOTORES ENCENDIDOS POR COMPRESION (MOTORES DIESEL)..... | 27 |
| 2.2 LEY COLOMBIANA EN DEFINICIÓN DE COMBUSTIBLE DIESEL O PARA OPERACIÓN EN MOTORES DIESEL .....                       | 28 |
| 2.3 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA COMBUSTIBLE DIESEL Y HEAVY FUEL OILS.....                                   | 29 |
| 2.3.1 Combustible 1-D .....   | 29 |
| 2.3.2 Combustible 2-D .....   | 30 |
| 2.3.3 Combustible 4-D .....   | 30 |
| 2.3.4 Destilados No. 1.....   | 31 |
| 2.3.5 Destilados No. 2.....   | 31 |
| 2.3.6 Destilado No. 4 .....   | 32 |
| 2.4 NORMATIVIDAD EN LOS AGENTES DE LA CADENA.....   | 33 |
| 2.4.1 Combustibles líquidos derivados de petróleo.....  | 34 |
| 2.4.2 Gran Consumidor.....  | 34 |
| 2.4.3 Gran consumidor con instalación fija .....  | 35 |
| 2.4.4 Gran Consumidor Individual No Intermediario de ACPM .....   | 35 |
| 2.4.5 Gran consumidor temporal con instalación .....  | 36 |
| 2.4.6 Gran consumidor sin instalación .....   | 37 |
| 2.4.7 Importador.....   | 37 |
| 2.4.8 Refinador .....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.9 Distribuidor Mayorista .....   | 38 |
| 2.4.10 Distribuidor Minorista .....  | 38 |
| 2.4.11 Comercializador Industrial.....   | 38 |
| 3. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN Y<br>COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS CON EL FUEL OIL LIGHT No.4 ..... | 40 |
| 3.1. GEOLOGÍA GENERAL .....  | 41 |
| 3.2. ESTRATIGRAFÍA.....  | 41 |
| 3.3 PRODUCCIÓN.....  | 43 |
| 3.4 PRODUCCIÓN ACUMULADA .....   | 44 |
| 3.5 PRUEBAS OPERATIVAS DE FUEL OIL LIGHT No.4 GENERADORES.....   | 46 |
| 3.5.1 Duración de la prueba.....   | 46 |
| 3.5.2 Etapas de la prueba con biodiésel .....  | 46 |
| 3.5.3 Requerimientos para la prueba con Biodiésel.....   | 47 |
| 3.5.4 Requerimientos para la prueba con Fuel Oil Light No.4 .....  | 48 |
| 3.5.5 Inspección del motor 600 Horas con Biodiésel .....   | 53 |
| 3.5.6 Inspección del motor 1500 horas con Fuel Oil Light No. 4.....  | 54 |
| 3.5.8 Análisis de Gases y Vapores .....  | 69 |
| 3.5.9 Análisis de la Prueba Realizada .....  | 70 |
| 3.6 PRUEBAS DE EMISIONES AMBIENTALES.....  | 73 |
| 3.6.1 Descripción del Programa de Medición .....   | 74 |
| 3.6.2 Procedimiento de Evaluación.....   | 75 |
| 3.6.3 Descripción de Equipos y Análisis .....  | 75 |
| 3.6.4 Métodos de Toma de Muestra y Análisis .....  | 76 |

|   |    |
|---|----|
| 3.6.5 Determinación del contenido de oxígeno del gas (Método EPA 3A)..... | 76 |
| 3.6.6 Determinación de la opacidad del gas de combustión.....             | 77 |
| 3.6.7 Localización del sitio de toma de muestra .....                     | 78 |
| 3.6.8 Procedimientos de Control y Aseguramiento de Calidad.....           | 79 |
| 3.6.9 Procedimiento de Medición.....                                      | 79 |
| 3.6.10 Equipos de Calibración Externa y Verificación en Laboratorio.....  | 79 |
| 3.6.11 Validación de Datos .....  | 82 |
| 3.6.12 Reporte de Resultados de Análisis .....                            | 83 |
| 3.6.13 Análisis de combustión .....                                       | 84 |
| 3.6.14 Reporte de errores en la evaluación de las emisiones .....         | 87 |
| 3.6.15 Resultado de los datos.....  | 88 |
| 4. EVALUACIÓN FINANCIERA.....   | 89 |
| 4.1 PRECIO BODIESEL.....  | 89 |
| 4.1.1 Ingreso al productor .....  | 89 |
| 4.1.2 Impuesto territorial .....  | 90 |
| 4.1.3 Impuesto nacional.....  | 90 |
| 4.1.4 Biocombustibles.....  | 91 |
| 4.1.5 Margen de distribución.....   | 91 |
| 4.1.6 Transporte.....   | 91 |
| 4.2 PRECIO FUEL OIL LIGHT No.4 .....                                      | 92 |
| 4.2.1 Heating Oil Nymex .....   | 93 |
| 4.3 ANALISIS DE VALOR PRESENTE NETO DIFERENCIAL .....                     | 94 |
| 4.3.1 Premisas .....  | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3.2 Análisis de Alternativas por medio de VPN..... | 96  |
| 4.3.2.1 Curvas de fluido .....                       | 96  |
| 4.3.2.2 Descripción de Variables .....               | 97  |
| 5. CONCLUSIONES .....                                | 101 |
| BIBLIOGRAFIA.....                                    | 103 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 1.</b> Tipos de biocombustibles.....  | 19   |
| <b>Tabla 2.</b> Comparación de las propiedades de Aceites Comestibles de Desecho (ACD), Biodiésel proveniente de ACD y del diésel comercial..... | 25   |
| <b>Tabla 3.</b> Requisitos resolución 898 de calidad del combustible diésel (ACPM).....  | 27   |
| <b>Tabla 4.</b> Requisitos resolución 180782 de calidad del Combustible Diésel (ACPM).....   | 28   |
| <b>Tabla 5.</b> Requisitos de Calidad del Combustible Diésel Según Norma Americana D975.....   | 32   |
| <b>Tabla 6.</b> Requisitos de Calidad del Combustible Fuel Oil Light No.4.....   | 33   |
| <b>Tabla 7.</b> Demanda de Energía.....  | 45   |
| <b>Tabla 8.</b> Comparación de propiedades.....  | 56   |
| <b>Tabla 9.</b> Comportamiento de consumo de Filtros.....  | 60   |
| <b>Tabla 10.</b> Límites contaminaste Gas.....   | 69   |
| <b>Tabla 11.</b> Identificación general del motor del generador.....   | 74   |
| <b>Tabla 12.</b> Equipos utilizados para la toma de muestras.....  | 75   |
| <b>Tabla 13.</b> Efecto de la opacidad en el desempeño de la fuente de combustión....  | 78   |
| <b>Tabla 14.</b> Calibración externa de equipos.....   | 82   |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 15.</b> Resumen de los detalles relativos al muestreo.....   | 83  |
| <b>Tabla 16.</b> Concentración de gases de combustión en generador PG-645 Biodiésel B8 como combustible.....                                | 84  |
| <b>Tabla 17.</b> Concentración de gases de combustión en el generador PG-645 Fuel Oil Light No.4.....                                       | 84  |
| <b>Tabla 18.</b> Concentración de gases de combustión en el Generador PG-645.....   | 85  |
| <b>Tabla 19.</b> Resumen promedio concentración de gases de combustión en generador PG-645 con Biodiesel B8 como combustible.....           | 85  |
| <b>Tabla 20.</b> Resumen promedio concentración de gases de combustión en el Generador PG-645 con Fuel Oil Light No.4 como combustible..... | 85  |
| <b>Tabla 21.</b> Premisas financieras.....  | 95  |
| <b>Tabla 22.</b> Producción estimada campo de estudio.....  | 96  |
| <b>Tabla 23.</b> Costo del rubro de combustible para generación con Biodiesel.....  | 97  |
| <b>Tabla 24.</b> Costo del rubro de combustible para generación con Fuel Oil Light No.4.....  | 98  |
| <b>Tabla 25.</b> Resumen VPN.....   | 99  |
| <b>Tabla 26.</b> Ahorro VPN.....  | 99  |
| <b>Tabla 27.</b> Beneficio costo.....   | 100 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica del campo en estudio.....                                | 40   |
| <b>Figura 2.</b> Columna estratigráfica. Cuenca Llanos Orientales.....                         | 42   |
| <b>Figura 3.</b> Producción Histórica del Campo.....   | 43   |
| <b>Figura 4.</b> Mapa Pozos 2015 Campo en estudio.....   | 44   |
| <b>Figura 5.</b> Producción acumulada.....   | 45   |
| <b>Figura 6.</b> Diagrama de las facilidades requeridas para la prueba.....                    | 48   |
| <b>Figura 7.</b> Ficha Técnica del motor.....  | 50   |
| <b>Figura 8.</b> Equipo electrógeno PG-645.....  | 51   |
| <b>Figura 9.</b> Cabeza del pistón CYL6 y CY5.....   | 51   |
| <b>Figura 10.</b> Aspecto interno CYL6 y CYL5.....   | 52   |
| <b>Figura 11.</b> Desmante de la culata CYL5 y CYL6; válvulas de admisión y escape<br>CYL..... | 52   |
| <b>Figura 12.</b> Galería de escape múltiple CYL5 y CYL6.....                                  | 52   |
| <b>Figura 13.</b> Estado corona de pistón CYL5 y CYL6.....                                     | 53   |
| <b>Figura 14.</b> Estado interno de la pared de la camisa del cilindro CYL4 y CYL3.....        | 54   |
| <b>Figura 15.</b> Estado interno de la pared de la camisa del cilindro.....                    | 54   |
| <b>Figura 16.</b> Corona pistón CYL6 y CYL5.....   | 54   |
| <b>Figura 17.</b> Cilindros 3, 4,5 y 6.....  | 55   |
| <b>Figura 18.</b> Válvulas de Admisión y escape CYL5 y CYL6.....                               | 55   |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 19.</b> Consumo de combustible.....   | 58 |
| <b>Figura 20.</b> Consumo de Biodiésel a las 600 horas de operación.....                          | 59 |
| <b>Figura 21.</b> Consumo de Fuel Oil Light No.4 a las 600 horas de operación.....                | 59 |
| <b>Figura 22.</b> Consumo de Filtros.....   | 61 |
| <b>Figura 23.</b> Temperatura del Motor.....  | 62 |
| <b>Figura 24.</b> Temperatura Gases de Escape.....  | 63 |
| <b>Figura 25.</b> Presión de Aceite.....  | 63 |
| <b>Figura 26.</b> Presión turbo.....  | 64 |
| <b>Figura 27.</b> KW- KVA.....  | 65 |
| <b>Figura 28.</b> Temperatura del Motor en las últimas 300 horas.....                             | 66 |
| <b>Figura 29.</b> Temperatura de gases de Escape en las últimas 300 horas.....                    | 66 |
| <b>Figura 30.</b> Presión de Aceite en las últimas 300 horas.....                                 | 67 |
| <b>Figura 31.</b> Presión Turbo en las últimas 300 horas.....                                     | 68 |
| <b>Figura 32.</b> KW-KVA en las últimas 300 horas.....  | 68 |
| <b>Figura 33.</b> Comportamiento del CO.....  | 70 |
| <b>Figura 34.</b> Esquema básico de operación de los motores generadores.....                     | 73 |
| <b>Figura 35.</b> Descripción de los puntos de medición de oxígeno en las fuentes de emisión..... | 74 |
| <b>Figura 36.</b> Comparación promedio gases de combustión en el Generador PG-645.....            | 86 |
| <b>Figura 37.</b> Comparación del porcentaje de oxígeno en el Generador PG-645.....               | 87 |
| <b>Figura 38.</b> Distribución precio Biodiesel.....  | 92 |

## RESUMEN

**TITULO:** REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN DE BIODIESEL POR FUEL OIL LIGHT No.4

**AUTOR:** ANDREA DEL PILAR VILLAMIL BUITRAGO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** REDUCCIÓN DE COSTOS, BIODIESEL, FUEL OIL, FUELOIL LIGHT NO.4, AHORROS EN COMBUSTIBLE.

### **DESCRIPCIÓN:**

La finalidad de este trabajo de monografía es evaluar técnica y económicamente la sustitución de combustible biodiesel por Fuel Oil light No.4 en equipos de generación eléctrica en el campo de estudio, ya que con la abrupta caída de los precios del petróleo las empresas han tomado como estrategia aplicar recortes en sus estructuras de costos, basándose en los ítems que generan mayor gasto en la producción de los hidrocarburos. De acuerdo a lo anterior se determinó al Combustible como uno de los mayores costos de producción, dado lo anterior se plantea, una sustitución de biodiesel por Fuel Oil light No.4.

Inicialmente se realiza una reseña describiendo las características generales del el Biodiésel y Fuel Oil light No.4, posteriormente se identifica y se describe la normatividad aplicable para uso de estos combustibles en la generación de los campos y los agentes de la cadena que intervienen para poder acceder a dichos combustibles.

Seguidamente se realiza la prueba y se evalúa el comportamiento de un generador con el uso de los dos combustibles, donde se evidencia positivamente el uso del Fuel Oil Light No.4, también se le realiza las mediciones ambientales y se comparan los parámetros.

Finalmente se realiza la evaluación financiera, donde se observa un ahorro considerable con la sustitución del biodiesel por el Fuel oil light No.4, generando ahorros a la compañía<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Ingeniería de Petróleos. Director Samuel Muñoz

## SUMMARY

**TITLE:** REDUCTION OF OPERATION COSTS THROUGH SUSTITUTION OF BIODIESEL FOR FUEL OIL LIGHT No. 4

**AUTHOR:** ANDREA DEL PILAR VILLAMIL BUITRAGO\*\*

**KEYWORDS:** COSTS REDUCTION, BIODIESEL, FUEL OIL,  
FUEL OIL LIGHT No.4, FUEL SAVING

### DESCRIPTION:

The purpose of this monograph is to technically and economically assess the sustitution of biodiesel for Fuel oil Light No. 4 in electric generation equipments for studies field, since with the abrupt fall of petroleum prices the companies have taken the strategy to apply cuts in their cost structures, based on the items that generate the most expenses in the hydrocarbon production. According to this, fuel has been determined as one of the highest costs in production, that's why a sustitution of biodiesel for Fuel Oil Light No. 4 is proposed.

At the beginning a review describing the general features of the biodiesel and the Fuel Oil Light No. 4 has been done, consequently we identify and describe the normativity that applies when using these fuels in the generation of the fields and also the agents of the chain that are involved in order to access those fuels.

Following this, a test is made in which the behavior of a generator using both fuels is evaluated, and a positive use of the Fuel Oil Light No. 4 is evidenced. Also, environmental measurements are done and their parameters are compared.

Finally, a financial evaluation is made, in this we can observe a considerable saving with the sustitution of biodiesel for Fuel Oil Light No. 4, generating savings for the company<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Monograph

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering College. Director Samuel Muñoz

## INTRODUCCIÓN

Ante el panorama actual de caída de los precios del petróleo que impactó sus ingresos y restringió su crecimiento, las compañías buscan alternativas de reducción de costos y uno de los factores que genera más gastos operativos es el combustible.

Actualmente en el campo de estudio, la obtención de energía para los pozos es por medio de red eléctrica, generación local con el suministro de biodiesel, lo cual ha causado altos costos de acuerdo al impacto energético que está atravesando la industria y el país.

Para reducir el costo operacional por barril del campo, se plantea minimizar el ítem de combustibles mediante la sustitución de biodiesel por un combustible alternativo Fuel Oil Light No.4 para generación eléctrica en motores de combustión interna de dos y cuatro tiempos, de ser viable la aplicación de la migración podría esperar una disminución en los costos operativos del campo.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### 1.1 COMBUSTIBLES Y BIOCOMBUSTIBLES

Un combustible se define como un cuerpo o sustancia líquida y gaseosa empleada para producir calor útil por medio de su combustión. De forma general, se establecen según su naturaleza dos tipos de combustibles; combustibles fósiles como: carbón, gas natural, petróleo (derivados) y los biocombustibles, provenientes del uso y transformación de la biomasa (Tabla 1).

**Tabla 1.**Tipos de biocombustibles

| SOLIDOS        | LIQUIDOS             | GASEOSOS  |
|----------------|----------------------|-----------|
| Paja           | Alcoholes            |           |
| Madera         | Biohidrocarburos     | Gasógeno  |
| Briquetas      | Ácidos Grasos        | Biogás    |
| Carbón Vegetal | Acigliceroles        | Hidrógeno |
|                | Aceites de pirolisis |           |

**Fuente:** Herrero, M., Juana, J., Santos, F., Macías, M. y Hernández, J. 1997. Energías Renovables para el desarrollo. Biocombustibles. Argentina.

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable ya que proceden de fuentes agrícolas (semillas, caña de azúcar, plantas oleaginosas), además de biomasa forestal y otras fuentes de materia orgánica. La transformación de biomasa en combustible para la generación de energía implica un acondicionamiento de la

materia prima y adaptaciones en los sistemas energéticos convencionales. Son usados en forma aislada o añadidos en mezclas con los combustibles fósiles.<sup>3</sup>

La resolución 91664 de Octubre de 2012 del ministerio de Minas y Energía resuelve el uso de la mezcla del Biodiésel en motores diésel será de acuerdo a la ubicación de las plantas de despacho ósea para Bogotá, el centro del país y los llanos orientales será de un 8% de Biocombustible y 92% de diésel fósil y se denominara B8. Y las ciudades que se abastezcan de estas plantas mezclaran 7% de biocombustible y 93% de diésel Fósil.<sup>4</sup>

## **1.2 BIODIÉSEL**

El biodiesel es un combustible alternativo renovable que se produce a partir de materia orgánica de fuentes agrícolas (aceites y grasas vegetales) y animales (sebo, manteca). Según la American Society of Testing and Materials (ASTM), el biodiesel técnicamente se define como: un combustible compuesto por mono-alquíl esterres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas de origen vegetal y animal [NBB, 2007].

El biodiésel tiene características físicas y químicas semejantes al diésel (gasóleo, petrodiesel) obtenido de la refinación del petróleo, pero presenta varias ventajas sobre este, ya que es renovable, biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y aromáticos, por lo que resulta ser un combustible limpio al tener en general

---

<sup>3</sup> Herrero, M., Juana, J., Santos, F., Macías, M. y Hernández, J. 1997. Energías Renovables para el desarrollo. Biocombustibles. Argentina.

<sup>4</sup> Ministerio de Minas y Energía. Decreto 91664 del 30 de Octubre de 2012. Bogotá.

menores emisiones contaminantes. Por lo anterior, su principal aplicación es como biocombustible en motores para automóviles.<sup>5</sup>

### **1.3 PROPIEDADES DE BIODIÉSEL**

Las propiedades del biodiésel tienen que ser comparable o mejor que el diésel, con el fin de asegurar el buen funcionamiento en motores, haciendo mínimas modificaciones. Las propiedades del biodiésel están definidas por las características de la materia prima (tipos y composición de AG del aceite), las más importantes para su uso en MD son el punto de inflamación, viscosidad, índice de cetanos, poder calorífico, número ácido y propiedades de flujo en frío (punto de nube y punto de gota). Las propiedades de flujo en frío se encuentran entre las más significativas y que son generalmente consideradas, básicamente se refieren a los cambios en las propiedades físicas, tales como: cristalización, gelificante y aumento de viscosidad debido a los cambios de temperatura, que podrían afectar el funcionamiento del sistema de inyección en el motor de los vehículos. Para las propiedades de flujo en frío del biodiésel, un porcentaje superior de AG insaturados en la materia prima tendrá como resultado biodiésel con mejores características. Por ejemplo, el biodiésel proveniente de aceite de palma posee propiedades pobres de flujo en frío, ya que tiene un alto contenido de AG saturados (alrededor del 50%). Por otro lado el biodiésel de aceite de colza, que tiene un alto contenido de AG insaturados tiene las mejores propiedades. Lo anterior es un factor decisivo en el empleo del biodiésel en regiones de clima frío, porque en la actualidad la mayor demanda está en los

---

<sup>5</sup> Larosa, J. 2004. Proceso para la producción de biodiesel, metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos. Refinación de glicerina. Editado por Ediciones Técnicas. Pág. 1-8. D.F., México.

países europeos, en estas regiones el proveedor acondiciona el biocombustible para las temperaturas de la zona donde será utilizado. <sup>6</sup>

### **1.3.1 Punto de Inflamación ("flash point")**

Se refiere a la cantidad de energía administrada para llevar a cabo la combustión además de determinar la cantidad de alcohol sin reaccionar y el tipo de motor al cual debe ser utilizado.

### **1.3.2 Viscosidad cinemática**

Debe tener una viscosidad de mínima para evitar pérdidas de potencia debido a fugas en el sistema de inyección. Provee características de lubricidad. Por otro lado se limita el valor viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño del motor y tipo del sistema de inyección.

### **1.3.3 Densidad**

Da ideal del contenido de energía del combustible con la relación directa de mayor energía térmica y eficiencia de combustión a mayor densidad.

---

<sup>6</sup> Gui, M., Lee K. y Bhatia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. Energy. 33(11):1646-1653.

#### **1.3.4 Numero Cetano**

El número cetano, contrariamente al número de octano, es un índice que se utiliza para determinar la calidad de ignición en base a la volatilidad del combustible. Para determinar el número de cetano de un combustible se compara la facilidad de inflamación del combustible en cuestión con la del combustible de referencia como el cetano puro, que es un hidrocarburo con baja temperatura de inflamación y se le asigna convencionalmente el número 100, mientras que el Alfa-metilnaftaleno que es otro hidrocarburo con muy alta temperatura de inflamación y se le asigna el número cero, (0). El número de cetano del combustible a examinar será igual que la porción de cetano de la mezcla que funcione en el motor de pruebas de manera equivalente. El valor número de cetano aumenta con una cadena más grande de carbonos saturados.

#### **1.3.5 Poder calorífico superior**

Características de los combustibles que se refiere a la cantidad de energía obtenida de la reacción de combustible. Mientras que el poder calorífico inferior es el calor realmente aprovechable; es decir, el producido sin aprovechar la energía de la condensación del agua.

#### **1.3.6 Índice de yodo**

Es una escala utilizada para definir el grado de insaturación de las cadenas alifáticas de Ácido graso y esteres de un compuesto orgánico. Representa la cantidad de

yodo que absorbe dicho compuesto del halógeno en presencia de catalizador que contiene triyoduro 0.1 N en medio ácido acético.

### **1.3.7 Punto de nube**

El punto de nube de productos derivados del petróleo y de biocombustibles es un índice de la temperatura más baja utilidad para ciertas aplicaciones. Indica la temperatura a la que empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, sustancias insaponificables), formando cristales en el aceite cuando es enfriado. Es una propiedad muy importante cuando es usado en climas fríos.

### **1.3.8 Lubricidad**

Es la cualidad de una sustancia de disminuir la fricción generada entre las partes móviles del motor. Los combustibles de baja viscosidad y de poco contenido de azufre tienen menor lubricidad.

### **1.3.9 Estabilidad oxidativa**

Se determina el tiempo de almacenamiento y la degradación potencial. La oxidación del combustible se suele acompañar de formación de gomas solubles e insolubles. La estabilidad puede ser mejorada por la adición de aditivos<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Ciria, J. 2009. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel. Publicado por Wearcheck Ibérica. Documentación del área técnica. España

### 1.3.10 Punto de gota

Característica de una grasa que se define como la temperatura mínima a la que una grasa calentada es suficientemente fluida para gotear.

### 1.3.11 Viscosidad absoluta

Se define como una medida de la resistencia de una sustancia al fluir, o como la fuerza por unidad de área requerida para mantener el fluido a una velocidad constante en un espacio considerado. La Tabla 2 presenta la comparación entre las propiedades del biodiésel proveniente de ACD y del diésel comercial reportadas en la literatura.

**Tabla 2.** Comparación de las propiedades de Aceites Comestibles de Desecho (ACD), Biodiésel proveniente de ACD y del diésel comercial

| PROPIEDADES DE COMBUSTIBLE        | ACD      | BIODIESEL A PARTIR DE ACDC | DIESEL COMERCIAL |
|-----------------------------------|----------|----------------------------|------------------|
| Viscosidad                        |          |                            |                  |
| Cinemática mm <sup>2</sup> /s     | 36.4     | 5.3                        | 1.9 - 4.1        |
| g/cm <sup>3</sup>                 | 0.924    | 0.897                      | 0.075-0.840      |
| inflamabilidad (°C )              | 212      | 196                        | 67-85            |
| Punto de gota (°C)                | 11       | -11                        | -19,-13          |
| Numero Cetanos                    | 49       | 54                         | 40-46            |
| Cenizas (%)                       | 0.005    | 0.004                      | 0.008-0.010      |
| Azufre (%)                        | 0.09     | 0.66                       | 0.35-0.55        |
| Carbón (%)                        | 0.45     | 0.33                       | 0.35-0.40        |
| Agua (%)                          | 0.42     | 0.04                       | 0.02-0.05        |
| Poder Calorífico Superior (MJ/kg) | 41.4     | 42.65                      | 44.62-46.48      |
| Ácidos grasos libres (mg KOH/g)   | 1.32     | 0.10                       | -                |
| saponificación                    | 188.2    | -                          | -                |
| Índice de yodo                    | 141.5    | -                          | -                |
| bibliográficas                    | FSA,2007 | Shay, 1993                 | Shay, 1993       |

**Fuente:** Rintoul, S. 2008. Análisis de biodiésel: de la materia prima al combustible. Publicado por la ANIAME. D.F., México.

## 1.4 DESTILADOS Y RESIDUOS

En general existen 2 clasificaciones para los productos derivados del petróleo:

- Destilados
- Residuos

Los residuos se conocen como “heavy fuel oils” y pueden contener algo de destilados. Por otro lado, dentro de la familia de los destilados que son fracciones que han sido vaporizadas y condensadas, producidos dentro de la refinería por un proceso de destilación en el cual el petróleo es separado en fracciones de acuerdo a los puntos de ebullición, estos pueden ser producidos no solo partir de la destilación atmosférica del crudo propiamente, sino que pueden producirse a partir de conversiones posteriores en procesos de refinería tales como el craqueo catalítico o térmico. Dentro de la familia de los destilados medios se encuentran el diésel para calefacción, el diésel para aplicaciones automotriz, el keroseno entre otros. Los residuos o “heavy fuel oils” son compuestos generalmente casi en su totalidad por fracciones de petróleo provenientes de la destilación del crudo (fondos de la torre de destilación bien sea a vacío o atmosférica). Existen varias clases de residuos que se producen en la actualidad enfocados a cumplir con ciertas especificaciones generalmente para procesos que envuelven combustión bajo condiciones controladas y estables como motores para generación de energía eléctrica. Los residuos se clasifican de acuerdo a su viscosidad mientras que los destilados lo hacen basados en sus rangos de ebullición<sup>8</sup>, los cuales se detallaran más adelante en el capítulo de normatividad en los usos de los combustibles.

---

<sup>8</sup> Salvatore R. Significance of tests for Petroleum products. Octava Edición. ASTM International. 2010.

## 2. NORMATIVIDAD APLICABLE PARA EL USO DE LOS COMBUSTIBLES EN LA GENERACION DEL CAMPO DE ESTUDIO

La normatividad es uno de los aspectos más importantes para determinar la sustitución del biodiésel por el Fuel Oil Light No.4, tanto su compra como su utilización están reguladas por el ministerio del medio ambiente y ministerio de Minas y Energía.

### 2.1 NORMA COLOMBIANA EN ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES PARA MOTORES ENCENDIDOS POR COMPRESION (MOTORES DIESEL)

La resolución 898 del 23 agosto de 1995 presentada por el misterio del medio ambiente tiene la función de regular los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores. Y en su artículo 4 menciona los siguientes requisitos de calidad:

**Tabla 3.** Requisitos de calidad del combustible diésel (ACPM)

| PARAMETRO        | ENERO<br>1/1996 | ENERO<br>1/1998 | ENERO<br>1/2002 |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Azufre (%)       | 0.4             | 0.1             | 0.05            |
| Aromáticos (%)   | 20              | 20              | 20              |
| Índice de Cetano | 45              | 45              | 45              |

**Fuente:** Ministerio del medio Ambiente. Resolución 898 del 23 de agosto de 1995. Bogotá.

La resolución 180782 del 30 de mayo de 2007 emite las especificaciones de los biocombustibles y de las mezclas diésel (ACPM) con biocombustibles. A continuación se realiza un extracto de las propiedades más importantes de la resolución.

**Tabla 4.** Requisitos de calidad del Combustible Diésel (ACPM)

| PARAMETRO   | VALOR   |
|---|---------|
| Destilación (Tem para 90% recuperado)                   | 360     |
| Punto Final de Ebullición Máximo                        | 390     |
| Viscosidad a 40°C, Mínimo - Máximo (mm <sup>2</sup> /s) | 1.9-5.0 |
| Índice de Cetano  | 45      |

**Fuente:** Ministerio del medio Ambiente. Resolución 18 0782 del 30 de Mayo de 2007. Bogotá.

## **2.2 LEY COLOMBIANA EN Definición DE COMBUSTIBLE DIESEL O PARA OPERACIÓN EN MOTORES DIESEL**

La ley 681 de 2001 en su artículo 30 define:

“Parágrafo. Para todos los efectos de la presente ley se entiende por ACPM, el aceite de combustible para motor, el diésel marino o fluvial, el marine diésel, el gas oil, intersol, diésel número 2, electro combustible o cualquier destilado medio y/o aceites vinculantes, que por sus propiedades físico químicas al igual que su desempeño en motores de altas revoluciones, pueden ser usados como combustible automotor. Se exceptúan aquellos utilizados para generación eléctrica en Zonas No interconectadas, el turbo combustible de aviación y las mezclas del tipo IFO utilizadas para el funcionamiento de grandes naves marítimas”

## **2.3 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA COMBUSTIBLE DIESEL Y HEAVY FUEL OILS**

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales establece siete niveles de grado para el petróleo diésel. Los niveles más bajos son más ligeros y contienen menos azufre. El azufre es un aspecto clave para la combustión del combustible diésel. El azufre también está regulado por la Agencia de Protección Ambiental. La EPA se asegura de que los niveles de azufre en el combustible diésel se mantienen dentro de un nivel sostenible. Los grados más alto nivel contienen más azufre y se utilizan principalmente para fines de calefacción.

### **2.3.1. Combustible 1-D**

El 1-D es una subcategoría de los grados de aceite combustible diésel de tres. Las calificaciones de esta categoría son 1-D S15, 1-D S500, y 1-D S5000. S15 es el más ligero mientras S5000 es el más pesado. Los números para estos grados indican el nivel de azufre en los combustibles diésel. Estos combustibles son 1-D para motores diésel que no se queman a altas temperaturas y requieren el cambio entre distintas velocidades. Un vehículo de motor que tiene que ir entre las velocidades utiliza 1-D combustibles. 1-D es también uno de los más nuevos niveles de combustible diésel a ser producido. El combustible se ha hecho desde la llegada de mayores regulaciones ambientales para elevar el nivel de combustible y los niveles más bajos de azufre en el combustible diésel. Los consumidores son capaces de decir si un combustible diésel es un 1-D si se anuncia como diésel ultra bajo en azufre.

### **2.3.2 Combustible 2-D**

El 2-D es otro sub-categoría de tres grados de aceite combustible diésel de grado más altos. Estos combustibles también contienen niveles de azufre observaron como 2-D S15, S500 2-D y 2-D S5000. Estos combustibles son para vehículos de motor más pesados que requieren combustibles de combustión más altas. Muchos camiones con cargas de gran tamaño requieren el uso de estos combustibles para quemar a altas velocidades. Vehículos no motores como los trenes suelen utilizar combustibles en 2D.

### **2.3.3 Combustible 4-D**

El 4-D es un solo grado de combustible diésel y el más pesado uno de los siete. Se requiere este combustible para vehículos de gran tamaño que necesitan para mantener una velocidad constante, como un barco de crucero.

El Fuel Oil y el diésel se clasifican como combustibles destilados, pero se utilizan para diferentes propósitos. Mientras que el aceite de combustible se utiliza principalmente para las fuentes de energía estacionarias, el combustible diésel es para los automóviles.

### **2.3.4 Destilados No. 1**

El Fuel Oil No. 1 y Diésel oil No. 1 son destilados de petróleo ligeros que difieren en la temperatura de destilación y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) especificaciones. N° 1 de combustible diésel tiene temperaturas de destilación de 550 grados Fahrenheit en el punto 90 por ciento. Mientras No. 1 de aceite de combustible tiene la misma temperatura de destilación, sino que también tiene un punto de recuperación 10 por ciento de los 400 grados Fahrenheit.

El combustible diésel No. 1 cumple con los requisitos descritos en la norma ASTM D 975 Especificaciones de aceite y de combustible N° 1 está definida por la especificación ASTM D 396. No. 1 de combustible diésel se utiliza en los motores diésel de alta velocidad y el aceite combustible No. 1 se utiliza principalmente como combustible para estufas y calentadores portátiles al aire libre al aire libre portátiles.

### **2.3.5 Destilados No. 2**

El Fuel Oil No.2 y Diésel Oil No.2 también son destilados de petróleo que se diferencian en la temperatura de destilación, pero cumplen las mismas especificaciones de la ASTM como No. 1 destilados. No. 2 destilados tienen temperaturas de destilación de 640 grados Fahrenheit en el punto 90 por ciento; Sin embargo, Fuel Oil No.2 y combustible diésel No. 2 tienen temperaturas de destilación de 400 grados Fahrenheit y 500 grados en el punto de recuperación 10 por ciento, respectivamente. No. 2 Fuel Oil se usa en unidades de quemadores comerciales e industriales y quemadores de tipo de atomización para la calefacción del hogar.

### 2.3.6 Destilado No. 4

El combustible No. 4 se hace mediante la mezcla de aceite combustible destilado y aceite combustible residual. Cumple con los requisitos de la especificación de la norma ASTM D 396 y se utiliza en quemadores industriales y comerciales. No. 4 de combustible diésel cumple la especificación ASTM D 975 y se utiliza para los motores diésel de baja a media velocidad.

Fuel Oil Light No.4 es un destilado medio del petróleo destinado a los motores encendidos por compresión (conocidos como motores diésel) desarrollado para motores de bajas revoluciones (hasta 1800 rpm) de generación o sistemas de bombeo.

En la Tabla 5 se muestran los requisitos que deben cumplir los combustibles diésel de acuerdo a la norma americana D976.

**Tabla 5.** Requisitos de Calidad del Combustible Diésel Según Norma Americana D975.

| PROPIEDADES  | Metodo ASTM | REQUISITOS DETALLADOS PARA DIESEL FUEL OILS |      |              |      |             |      |               |      |
|--|-------------|---|------|--------------|------|-------------|------|---------------|------|
|  |             | Grado No. 1-D S15                           |      | No. 1-D S500 |      | No. 2-D S15 |      | No. 2-D S5000 |      |
| Punto de Inflamabilidad °C, min  | D93         | 38  | 38   | 38           | 52   | 52          | 52   | 52            | 55   |
| % Agua y Sedimentos Vol Max  | D2709       | 0.05  | 0.05 | 0.05         | 0.05 | 0.05        | 0.05 | 0.05          |      |
|  | D1796       |   |      |              |      |             |      |               | 0.05 |
| Temperatura de Destilación °C 90 % , porcentaje de Volumen recobrado                 | D86         |   |      |              |      |             |      |               |      |
| Min  |             |   |      |              | 282  | 282         | 282  |               |      |
| Max  |             | 288   | 288  | 288          | 338  | 338         | 338  |               |      |
| Viscosidad Cinemática mm <sup>2</sup> /s a 40 °C                                     | D445        |   |      |              |      |             |      |               |      |
| Min  |             | 1.3   | 1.3  | 1.3          | 1.9  | 1.9         | 1.9  |               | 55   |
| Max  |             | 2.4   | 2.4  | 2.4          | 4.1  | 4.1         | 4.1  |               | 24   |
| % cenizas, Max   | D482        | 0.01  | 0.01 | 0.01         | 0.01 | 0.01        | 0.01 | 0.01          | 0.10 |
| Azufre ppm (µg/g) Max  | D5453       | 15  | ...  | ...          | 15   | ...         | ...  | ...           | ...  |
| % masa, Max  | D2622       |   |      |              |      |             |      |               |      |
| % masa, Max  | D129        | ...   | ...  | 0.50         | ...  | ...         | 0.5  | 2.00          |      |
| Grado de corrosión del cobre Max (3h a un mínimo de control de temperatura de 50 °C) | D130        | No.3  | No.3 | No.3         | No.3 | No.3        | No.3 | ...           |      |
| Numero Cetano, min   | D613        | 40  | 40   | 40           | 40   | 40          | 40   | 30            |      |
| Indice Cetano, min   | D976-80     | 40  | 40   | ...          | 40   | 40          | ...  | ...           |      |
| % Aromaticidad Vol. Max  | D1319       | 35  | 35   | ...          | 35   | 35          | ...  | ...           |      |
| REQUERIMIENTOS OPERACIONALES   |             |   |      |              |      |             |      |               |      |
| Punto de Nube °C, Max o  | D2500       | /   | /    | /            | /    | /           | /    | ...           |      |
| LTFT/CFPP °C, Max  | D4539/D637  |   |      |              |      |             |      |               |      |
| Residuo de carbono Ramsbottom el residuo de destilación del 10% , % max              | D524        | 0.15  | 0.15 | 0.15         | 0.35 | 0.35        | 0.35 | ...           |      |
| Lubricidad HFRR @60 °C micrón, Max   | D6079       | 520   | 520  | 520          | 520  | 520         | 520  | 520           |      |
| Conductividad, pS/m o Unidad Conductividad (CU), Min                                 | D6079       | 520   | 520  | 520          | 520  | 520         | 520  | 520           |      |

**Fuente:** American Society for Testing and Materials (ASTM). D975 Standard Specification for Diésel Fuel Oils.

En la Tabla 6 se indica por otro lado, las especificaciones de los combustibles “Fuel Oils”.

**Tabla 6.** Requisitos de Calidad del Combustible Fuel Oil

| REQUISITOS DETALLADOS PARA FUEL OILS   |                            |            |             |            |             |                     |       |               |               |       |
|--|----------------------------|------------|-------------|------------|-------------|---------------------|-------|---------------|---------------|-------|
| PROPIEDADES  | Metodo ASTM                | Grado      |             |            |             |                     |       |               |               |       |
|  |                            | No. 1 S500 | No. 1 S5000 | No. 2 S500 | No. 2 S5000 | Grado No. 4 (Light) | No. 4 | No. 5 (Light) | No. 5 (Heavy) | No. 6 |
| Punto de Inflamabilidad °C, min  | D93 Proc. A<br>D93 Proc. B | 38         | 38          | 38         | 38          | 38                  |       |               |               |       |
| % Agua y Sedimentos Vol Max  | D2709<br>D1796             | 0.05       | 0.05        | 0.05       | 0.05        | 0.05                |       | 55            | 55            | 60    |
| Temperatura de Destilación °C  | D95+D473<br>D86            | ...        | ...         | ...        | ...         | 0.5                 | 0.5   | 1             | 1             | 2     |
| 10% Volume recobrado max   |                            | 215        | 215         | ...        | ...         |                     |       |               |               |       |
| 90% Volume recobrado min   |                            | ...        | ...         | 282        | 282         |                     |       |               |               |       |
| 90% Volume recobrado max   |                            | 288        | 288         | 338        | 338         |                     |       |               |               |       |
| Viscosidad Cinemática mm <sup>2</sup> /s a 40 °C                                     | D445                       |            |             |            |             |                     |       |               |               |       |
| Min  |                            | 1.3        | 1.3         | 1.9        | 1.9         | 1.9                 | >5.5  | ...           | ...           | ...   |
| Max  |                            | 2.4        | 2.4         | 4.1        | 4.1         | 5.5                 | 24.E  |               |               |       |
| Viscosidad Cinemática mm <sup>2</sup> /s a 100 °C                                    | D445                       |            |             |            |             |                     |       |               |               |       |
| Min  |                            | ...        | ...         | ...        | ...         | ...                 | ...   | 5             | 9             | 15    |
| Max  |                            | ...        | ...         | ...        | ...         | ...                 | ...   | 8.9E          | 14.9E         | 50.E  |
| Residuo de carbono Ramsbottom el residuo de destilación del 10% , % max              | D524                       | 0.15       | 0.15        | 0.35       | 0.35        | ...                 | ...   | ...           | ...           | ...   |
| % cenizas, Max   | D482                       | ...        | ...         | ...        | ...         | 0.05                | 0.10  | 0.15          | 0.15          | ...   |
| Azufre ppm. (µg/g) Max   | D129                       | ...        | 0.50        | ...        | 0.5         | ...                 | ...   | ...           | ...           | ...   |
| Grado de corrosión del cobre Max (3h a un mínimo de control de temperatura de 50 °C) | D130                       | No.3       | No.3        | No.3       | No.3        | ...                 |       |               |               |       |
| Densidad a 15 °C kg/m <sup>3</sup>   | D1298                      |            |             |            |             |                     |       |               |               |       |
| min  |                            | ...        | ...         | ...        | ...         | >876G               | ...   | ...           | ...           | ...   |
| max  |                            | 850        | 850         | 876        | 876         |                     |       |               |               |       |
| Punto de Fluides °C Max  | D97                        | -18        | -18         | -6         | -6          | -6                  | -6    | ...           | ...           | ...   |

**Fuente:** American Society for Testing and Materials (ASTM). D975 Standard Specification for Diésel Fuel Oils. 2012

## 2.4 NORMATIVIDAD EN LOS AGENTES DE LA CADENA

Para poder acceder al combustible hay una serie de condiciones que se estipulan para su uso, por lo anterior el Decreto 1073 del Ministerio De Minas y Energía, tiene como objetivo establecer los requisitos, obligaciones, aplicables a los agentes de la cadena de distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo.

La refinación, almacenamiento, manejo, transporte y distribución de los combustibles líquidos derivados del petróleo son considerados servicios públicos que se prestarán conforme a la ley, dado lo anterior, los agentes de la cadena de distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, prestarán el servicio en forma regular, adecuada y eficiente, de acuerdo con las características propias de este servicio público.

#### **2.4.1 Combustibles líquidos derivados de petróleo**

Son todos los productos clasificables dentro de las categorías de las gasolinas, gasóleos, querosenes y fuelóleos, entre los cuales se cuentan: Combustibles para aviación (avigás), gasolina motor (gasolina extra, gasolina corriente, gasolina corriente oxigenada, gasolina extra oxigenada), combustibles de aviación para motores tipo turbina, queroseno, diésel extra o de bajo azufre, diésel corriente (ACPM), diésel marino (se conoce también con los siguientes nombres: diésel fluvial, marine diésel, gas oil, intersol, diésel número 2), y combustible para quemadores industriales (combustóleos, fuel oil).

Los agentes que intervienen en la cadena descritos en el Decreto 1073 del MME son:

#### **2.4.2 Gran Consumidor**

Persona natural o jurídica que, por cada instalación, consume en promedio anual más de 20.000 galones mes de combustibles líquidos derivados del petróleo para uso propio y exclusivo en sus actividades.

### **2.4.3 Gran consumidor con instalación fija**

Es aquel Gran Consumidor que cuenta con instalaciones que permiten descargar, almacenar y despachar combustibles líquidos derivados del petróleo.

El gran consumidor temporal con instalación deberá abastecerse únicamente de un solo distribuidor mayorista. No obstante, el gran consumidor con instalación fija que consume ACPM en volúmenes iguales o superiores a cuatrocientos veinte mil (420.000) galones mes, combustibles para quemadores industriales (combustóleos - fuel oil), y/o gasolina natural - nafta, podrán además abastecerse del importador o refinador.<sup>9</sup>

### **2.4.4 Gran Consumidor Individual No Intermediario de ACPM**

Únicamente para efectos de aplicar el artículo 14 de la Ley 681 de 2001, se considera Gran Consumidor Individual No Intermediario de ACPM aquel que tiene un consumo propio de ACPM, nacional o importado, igual o superior a diez mil (10.000) barriles mensuales. Los Sistemas de Transporte Terrestre Masivos de Pasajeros y las empresas generadoras de energía ubicadas en las Zonas Interconectadas del Territorio Nacional serán considerados como Grandes Consumidores Individuales No Intermediarios de ACPM, independientemente de su consumo.

Para los Grandes Consumidores Individuales No Intermediarios de Acpm ya definidos, el ingreso al productor al cual ECOPETROL S.A. o quien haga sus veces venderá el Acpm producido en las refinerías del país, distribuido de manera directa

---

<sup>9</sup> Ministerio de Minas y Energía. Decreto 1073 del 26 de agosto de 1995. Bogotá.

o a través de los distribuidores mayoristas, será como mínimo, el promedio de precios FOB del Diésel Oil exportado por ECOPETROL S.A. en los 30 días calendario precedentes a la fecha de facturación, o el precio internacional equivalente de las cotizaciones de los 30 días calendario precedentes a la fecha de facturación del índice No. 2 U. S. Gulf Coast Waterborne de la publicación Platt's de Standard & Poor's, cuando no se hayan presentado exportaciones dentro de ese mismo período.

Cuando por atender necesidades normales o adicionales de Grandes Consumidores Individuales No Intermediarios de Acpm, ECOPETROL S.A. requiera importar o recurrir a otra fuente de abastecimiento diferente a las refinerías de su propiedad, el ingreso al productor al cual ECOPETROL S.A. podrá vender dicho producto, distribuido de manera directa o a través de los distribuidores mayoristas, deberá como mínimo remunerar todos los costos en que incurra ECOPETROL S.A. para realizar estas actividades, sin que en ningún caso pueda ser inferior al precio de exportación del producto.

#### **2.4.5 Gran consumidor temporal con instalación**

Es aquel gran consumidor que cuenta con instalaciones que permiten descargar, almacenar y despachar combustibles líquidos derivados del petróleo y que para el desarrollo de su actividad, como la ejecución de obras de infraestructura, servicios petroleros, exploración y explotación petrolera y minera y actividades agroindustriales, requiera el consumo de combustibles en un periodo que no exceda de un año.

#### **2.4.6 Gran consumidor sin instalación**

Es aquel gran consumidor que consume combustibles para uso propio y exclusivo en sus aeronaves, buques o naves. El gran consumidor sin instalación se podrá abastecer del distribuidor mayorista y/o distribuidor minorista a través de una estación de servicio de aviación, marítima o como comercializador industrial.

#### **2.4.7 Importador**

Toda persona natural o jurídica que ejerce la actividad de importación de combustibles líquidos derivados del petróleo, conforme a lo establecido en el decreto 1073 del 26 de Mayo de 2015.

#### **2.4.8 Refinador**

Toda persona natural o jurídica que ejerce la actividad de refinación de Hidrocarburos para la producción de combustibles líquidos derivados del petróleo.

El refinador solamente podrá distribuir los combustibles líquidos derivados del petróleo que produzca a otro refinador, al distribuidor mayorista, al distribuidor minorista a través de estación de servicio de aviación y marítima, al gran consumidor con instalación fija que consuma Acpm en volúmenes iguales o superiores a cuatrocientos veinte mil (420.000) galones mes y al gran consumidor con instalación fija que consuma combustibles para quemadores industriales (combustóleos - fuel oil), y/o gasolina natural - nafta.

#### **2.4.9 Distribuidor Mayorista**

Toda persona natural o jurídica dedicada a ejercer la distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, a través de una planta de abastecimiento.

El distribuidor mayorista debe demostrar que en la planta o plantas de abastecimiento que tiene a su cargo ha realizado despachos, mediante contratos o acuerdos comerciales, de combustibles líquidos derivados del petróleo en volúmenes superiores a dos millones seiscientos mil (2.600.000) galones al mes, de los cuales el setenta por ciento (70%) como mínimo debe corresponder a despachos realizados a distribuidores minoristas a través de estaciones de servicio automotriz y/o fluvial que cuenten con su marca.

#### **2.4.10 Distribuidor Minorista**

Toda persona natural o jurídica dedicada a ejercer la distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo al consumidor final, a través de una estación de servicio (automotriz, de aviación, fluvial o marítima) o como comercializador industrial, deberá obtener, previamente, autorización del Ministerio de Minas y Energía o de la autoridad en quien este delegue.

#### **2.4.11 Comercializador Industrial**

Es el distribuidor minorista que utilizando vehículos tipo carrocería tanque o barcazas habilitadas para almacenar y distribuir combustibles líquidos derivados del petróleo.

El comercializador industrial únicamente podrá distribuir combustibles líquidos derivados del petróleo al consumidor final que consuma un volumen igual o menor a veinte mil (20.000) galones al mes, al gran consumidor sin instalación y a la estación de servicio de aviación de propiedad de las Fuerzas Militares.

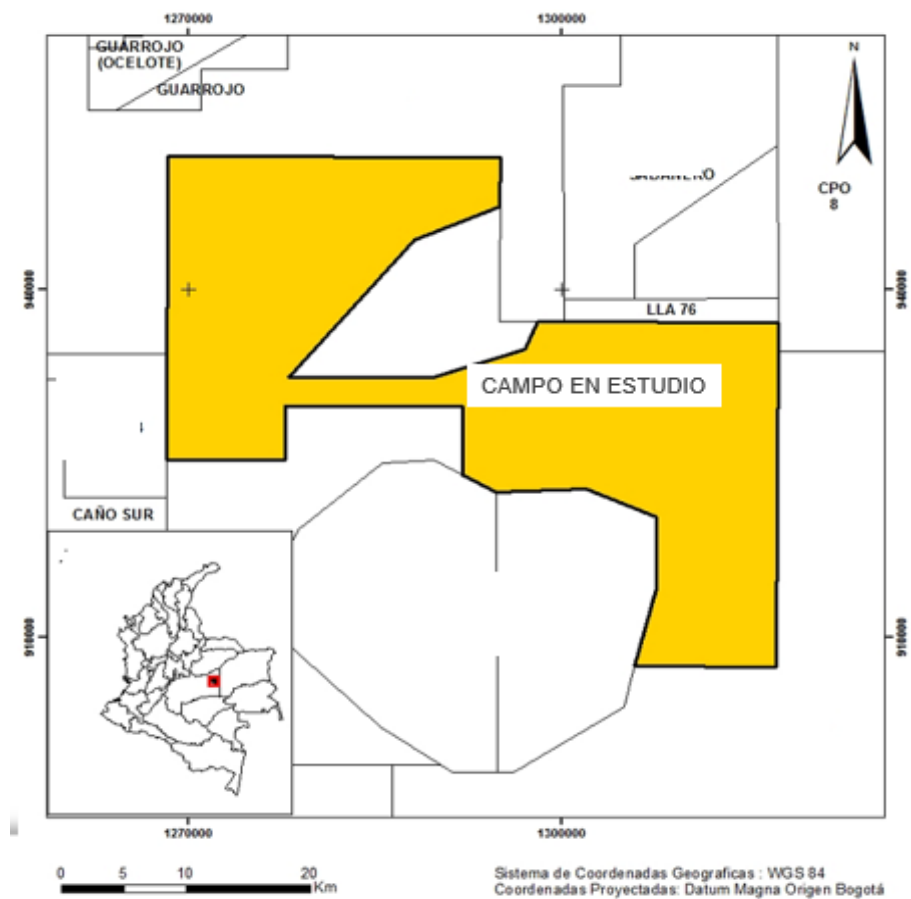
De acuerdo al decreto 1073 del Ministerio de Minas y Energía, los despachos y las entregas de biodiésel y el Fuel Oil Light No.4 deben ser registras en el Sistema Información de Combustibles Líquidos Derivados del Petróleo Sicom. Con el fin de tener seguimiento ya que estas son sustancias controladas.

Dadas las descripciones anteriores el campo en estudio es un Gran consumidor de instalación fija y el producto Fuel Oil Light No.4 se adquiere de una Refinería en el Casanare.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS CON EL FUEL OIL LIGHT No.4

El campo en estudio está localizado a 250 Km al SE de la ciudad de Villavicencio, en el extremo oriental de la cuenca de los Llanos Orientales en el departamento del Meta y cubre un área de 152.743,171 hectáreas (Figura 1).

**Figura 1.** Ubicación geográfica del campo en estudio



**Fuente:** Archivo del Campo de estudio

Durante el año 2015 se construyeron las facilidades de superficie necesarias para mantener la capacidad de producción de Campo en estudio a 60 KBOPD y ampliación de capacidad para tratamiento de Agua hasta 1350 KBWPD.

### **3.1. GEOLOGÍA GENERAL**

Geológicamente el Bloque al que pertenece el campo en estudio se encuentra ubicado en una porción de cuenca antepaís, donde algunos sedimentos Paleógenos y Neógenos están descansando sobre rocas Precámbricas y Paleozoicas del Escudo de la Guayana.

La Cuenca de los Llanos Orientales presenta un desarrollo correspondiente a una mega secuencia de Synrift relacionada con la separación del norte y el sur de América en el Protocaribe (Cooper et al., 1995).

### **3.2. ESTRATIGRAFÍA**

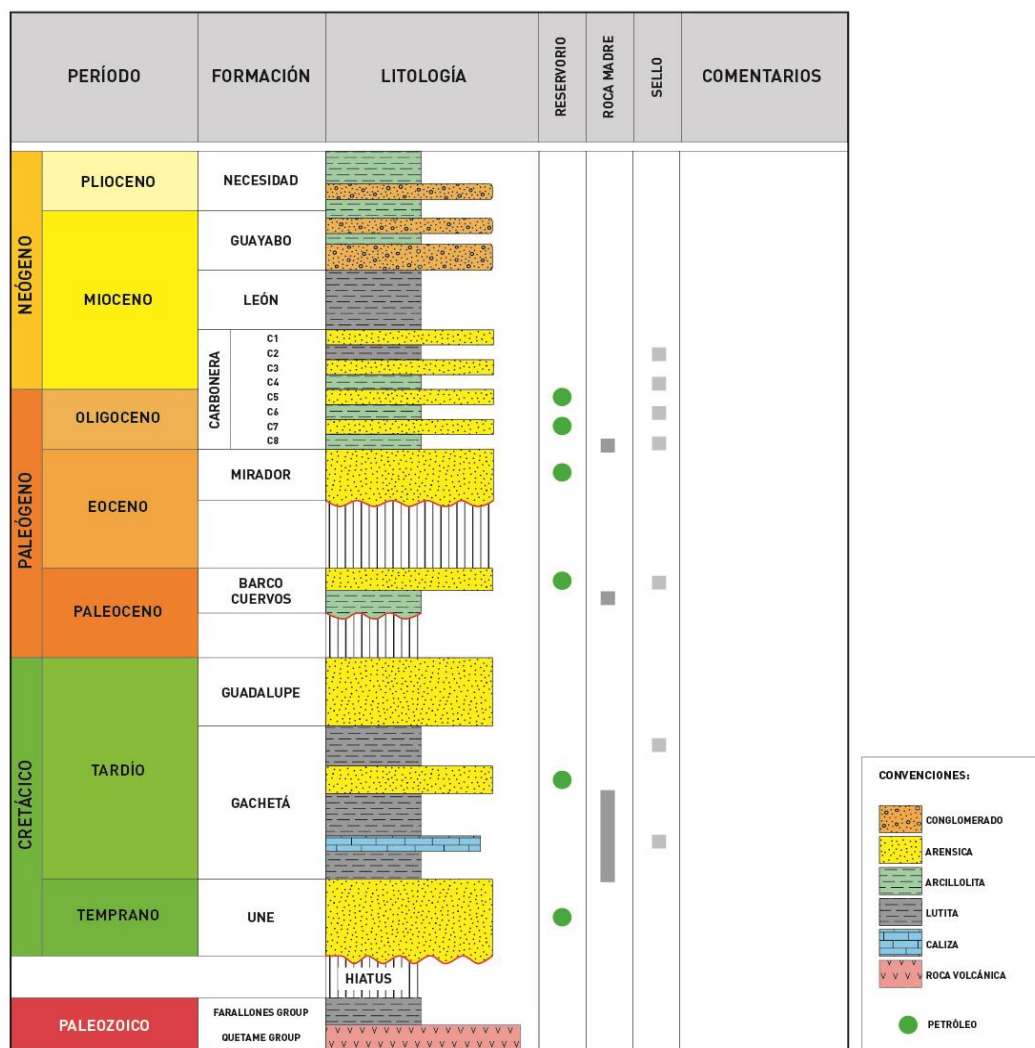
La Cuenca de los Llanos Orientales se extiende desde el cabalgamiento frontal de la Cordillera Oriental de Colombia, al oeste, hasta los afloramientos precámbricos del Escudo Guayanés (río Orinoco-Guaviare) al este. Se trata de una cuenca asimétrica constituida por sedimentos Cretáceos y Terciarios que descansan discordantemente sobre el Paleozoico y el Basamento.

La secuencia sedimentaria de edad Paleozoica-Pleistoceno sobrepasa los 25.000 ft en proximidades de la Cordillera Oriental y disminuye progresivamente en dirección este-sureste, donde alcanza aproximadamente de 2000 a 3000 ft.

La secuencia estratigráfica en la cuenca está constituida por rocas que van desde el Precámbrico, pasando por el Paleozoico Inferior, Cretácico y Terciario (Formaciones Carbonera y León, Guayabo y Necesidad) separadas por discordancias regionales (Figura 2).

**Figura 2.** Columna estratigráfica. Cuenca Llanos Orientales.

**Cuenca Llanos.** Columna estratigráfica generalizada.

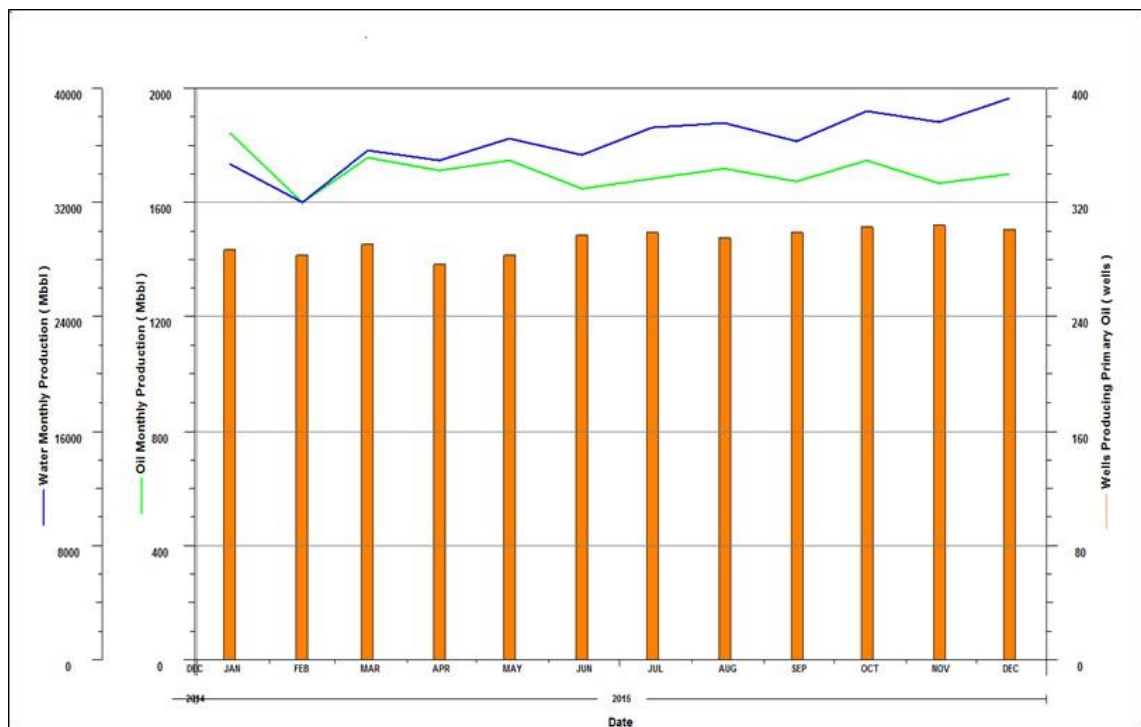


**Fuente:** Archivo Departamento Yacimientos del Campo de estudio

### 3.3 PRODUCCIÓN

Para el Campo en estudio entraron a producción 73 nuevos pozos perforados durante el año 2015; que debido a eventos operacionales, como fue el incremento de presión en las troncales, impidieron el incremento en la producción del campo, lo cual no permitió la optimización de los pozos a potencial y de esta manera la producción presentó un decremento de 60.015 bopd en Diciembre de 2014 a 59.511 bopd en Enero de 2015, finalizando en Diciembre de 2015 en 54.835 bopd. En la Figura 3, se presenta el comportamiento histórico para el año 2015.

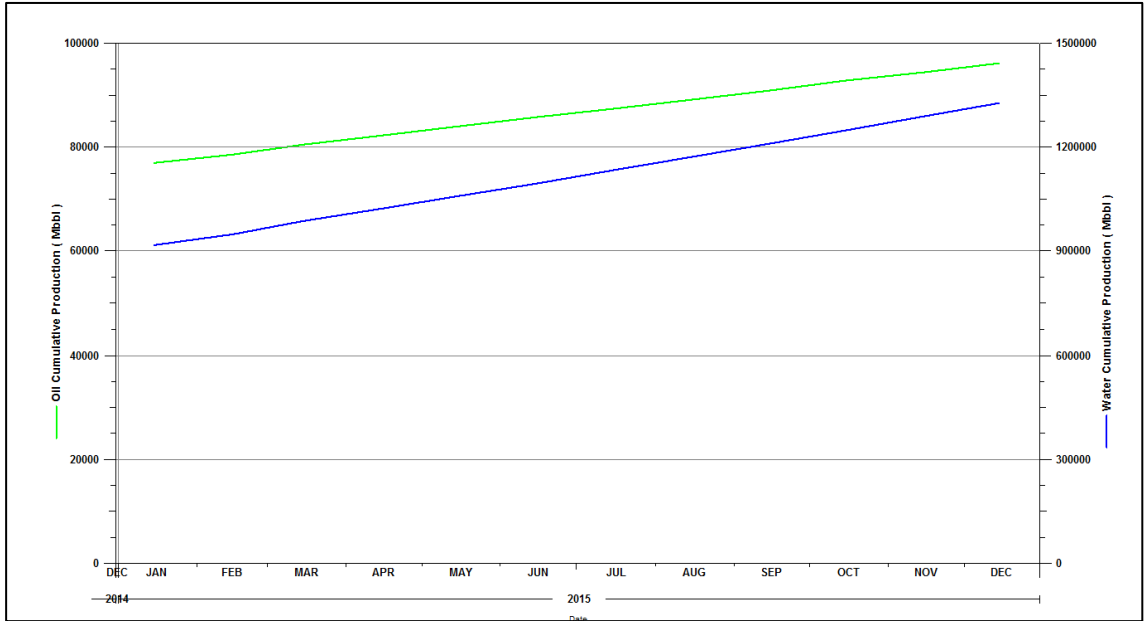
**Figura 3.** Producción Histórica del Campo



**Fuente:** Archivo Departamento de producción del campo en estudio



**Figura 5.** Producción acumulada



**Fuente:** Archivo Departamento de producción del campo en estudio

El consumo eléctrico del campo está distribuido en generación para pozos, generación para inyección de agua, generación para campamentos y generación en el centro de facilidades, la potencia total requerida para generación de electricidad es 72,71MW, donde está conectado a la red eléctrica 62,5 MW y los puntos no electrificados son generados con Fuel Oil light No.4

**Tabla 7.** Demanda de Energía

| DEMANDA DE ENERGIA |  |                       |                           |
|--------------------|--|-----------------------|---------------------------|
|                    | ENERGIA TOTAL<br>REQUERIDA POR EL<br>CAMPO | LINEA ELECTRICA<br>MW | FUEL OIL LIGHT<br>NO.4 MW |
| <b>POTENCIA</b>    | <b>72,71</b>                               | <b>62,51</b>          | <b>10,2</b>               |

**Fuente:** Archivo Departamento de Mantenimiento

### **3.5 PRUEBAS OPERATIVAS DE FUEL OIL LIGHT No.4 GENERADORES**

Esta prueba tiene como objetivo establecer la viabilidad técnica para el cambio del combustible que se viene utilizando en los moto generadores propios y alquilados de nuestro sistema de generación eléctrica local, complementando así la ventaja costo-beneficio que ofrece este combustible y siempre teniendo como referente el mínimo impacto en el medio ambiente.

Se tiene previsto que se realizará esta prueba con 1 moto generador de 275 KW de potencia el motor es NT855 CUMMINS de la compañía Power Group. Las pruebas se llevaran a cabo en las locaciones de campo en estudio por un periodo de cuatro (4) semanas con combustible convencional (biodiésel) para establecer línea base de datos y cinco (5) semanas con combustible Fuel Oil Light No.4, para un total de 1500 horas de operación. Se define preliminarmente como sitio de prueba, la isla o Cluster 1, con las condiciones descritas, y con flexibilidad posible aumento de carga en periodo de prueba. La producción actual del clúster está en 26 BOPH.

#### **3.5.1 Duración de la prueba**

1 semana – 600 horas: Con combustible Diésel convencional.

4 semanas – 900 horas: Con combustible Fuel Oil Light No.4.

#### **3.5.2 Etapas de la prueba con biodiésel**

Selección de los equipo (Moto generador Diésel) para la prueba. Se consolida el alcance de la prueba y se gestiona la consecución de los equipos, esto como factor determinante del ejercicio. Se solicita la participación de las empresas que suministran en alquiler este tipo de equipos.

### 3.5.3 Requerimientos para la prueba con Biodiésel

- ✓ Un (1) Moto generador en condiciones operativas optimas, preferiblemente nuevos o recién reparados.
- ✓ Un (1) tanque de combustible con dique incorporado 5000 galones de capacidad.
- ✓ Un (1) tanques de nivel constante mejorado.
- ✓ 1 medidores de flujo.
- ✓ Mangueras y accesorios de conexión Moto generador – Tanque.

Determinación de línea base de condiciones operacionales y selección de variables significativas. Se desarrolla todo el marco conceptual del ejercicio, se levanta toda la información requerida antes, durante y después de la prueba con combustible convencional para así generar la línea base de información.

- ✓ Combustible Diésel convencional (6300 Galones).
- ✓ Suministro de medidores de flujo de combustible a la entrada del motor.
- ✓ Método y facilidades para medición de combustible por línea de retorno.
- ✓ Servicio de medición de emisiones de gas de escape un día después de iniciar y un día antes de finalizar la prueba con combustible Diésel convencional.
- ✓ Análisis de las muestras de aceite lubricante tomadas durante las pruebas.
- ✓ Mantenimientos preventivos al iniciar y finalizar la prueba con combustible Diésel convencional (Cambio de aceite, filtros (aire, aceite y combustible)).

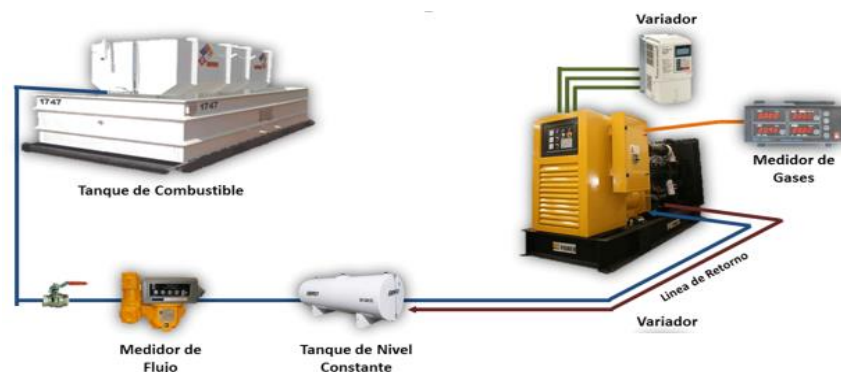
### 3.5.4 Requerimientos para la prueba con Fuel Oil Light No.4

La prueba con combustible Fuel Oil Light No.4. Se deben garantizar todas las condiciones operativas que se facilitaron para la prueba con combustible convencional y así validar los datos de referencia. Se llevarán registros detallados de las variables operativas y significativas para la prueba, esto con el fin de garantizar la integridad de los equipos y la confiabilidad de los datos.

- ✓ Combustible Fuel Oil Light No.4 (30.000 Galones).
- ✓ Servicio de medición de emisiones de gas de escape un día después de iniciar, cada semana y un día antes de finalizar la prueba.
- ✓ Análisis de las muestras de aceite lubricante tomadas durante las pruebas.
- ✓ Mantenimientos preventivos al iniciar (0 horas), a las 350 horas de operación y al finalizar la prueba (a las 900 horas). (Incluye Cambio de aceite, filtros (aire, aceite y combustible) e inspección con lámpara boroscópica.

Análisis de resultados de la prueba con los datos base Vs prueba Fuel Oil Light No.4  
Se consolidan los datos y se realizan los comparativos de los resultados (Diésel convencional Vs Fuel Oil Light No.4).

Figura 6. Diagrama de las facilidades requeridas para la prueba.



**Fuente:** Archivo Departamento de Mantenimiento

De acuerdo a la metodología planteada anteriormente se analiza el comportamiento del motor NT855 CUMMINS de 275 KW con la utilización del combustible biodiésel y el Fuel Oil Light No.4, y poder determinar los pro y contra del uso de los dos combustibles.


Durante la prueba de combustible se utilizó la ayuda de la telemetría para supervisar día a día y minuto a minuto todas las variables del grupo electrógeno, mediante la herramienta de supervisión remota, se analizó el comportamiento y la tendencia de las variables más significativas para esta prueba que pudieran mostrar alguna diferencia entre los dos combustibles, mediante los registros históricos obtenidos por la telemetría.

La variable más importante de esta prueba es el combustible, es por esta razón que se realiza un minucioso seguimiento determinando el consumo real del equipo y el consumo teórico dado por el fabricante, este análisis se hace con respecto a la carga con que está trabajando la planta, también se realiza un análisis de los componentes químicos de cada uno de estos combustibles y sus implicaciones en el proceso de inyecciones y su funcionamiento en general; de la misma forma se le realiza un seguimiento a los filtros de combustible externo, primario, secundario, filtros de aceite, filtro de aire y a los cambios de aceite, con el fin de determinar si hay alguna alteración en la frecuencia de cambio con dichos filtros de puedan significar un ahorro en filtración.

Es importante también analizar los gases y vapores generados por cada uno de los combustibles puestos a prueba, ya que sus componentes de escape, luego de la combustión, tienen que estar dentro de los límites ambientales y de salud aceptados por organismos de la salud para que no afecten al medio ambiente y a los operarios de las plantas.

Durante la prueba se toman muestras de aceite directamente del motor cada 300 horas de operación, posteriormente se envían al laboratorio de Shell para que le realicen el estudio de LubeAnalyst y de esta forma poder obtener un análisis del comportamiento del aceite a cada uno de los combustibles.

**Figura 7.** Ficha Técnica del motor

|  | CUMMINS ENGINE COMPANY, INC<br>Columbus, Indiana 47201<br>ENGINE PERFORMANCE CURVE | Basic Engine Model:<br><b>NT855-G6</b>            | Curve Number:<br><b>FR-1524</b> | Page No. |                  |     |
|---|--|---|---------------------------------|----------|------------------|-----|
|   |  | Engine Critical Parts List:<br><b>CPL: 1381</b>   | Date:<br><b>30Sep08</b>         |          |                  |     |
| Displacement : 14.0 litre (855 in <sup>3</sup> )                                  |  | Bore : 140 mm (5.5 in.) Stroke : 152 mm (6.0 in.) |                                 |          |                  |     |
| No. of Cylinders : 6  |  | Aspiration : Turbocharged                         |                                 |          |                  |     |
| Engine Speed<br>RPM   | Standby Power  |   | Prime Power                     |          | Continuous Power |     |
|   | kWm  | BHP   | kWm                             | BHP      | kWm              | BHP |
| 1500  | 310  | 415   | 280                             | 375      | 231              | 310 |
| 1800  | 325  | 435   | 295                             | 395      | 254              | 340 |

**Cummins Engine Company, Inc.**  
**Engine Data Sheet**

ENGINE MODEL : **NT855-G6**      CONFIGURATION NUMBER : D092565DX02      DATA SHEET : DS-1524  
DATE : 30Sep08  
PERFORMANCE CURVE : FR-1524

**INSTALLATION DIAGRAM**

- Fan to Flywheel : 3020384
- Heat Exchanger Cooled :

**CPL NUMBER**

- Engine Critical Parts List : 1381

**GENERAL ENGINE DATA**

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Type.....   | 4-Cycle, In-line, 6-Cylinder Diesel |
| Aspiration.....   | Turbocharged                        |
| Bore x Stroke.....  | 5.5 x 6.0 (140 x 152)               |
| Displacement.....   | 855 (14.0)                          |
| Compression Ratio.....                                    | 14.0: 1                             |
| <b>Dry Weight</b>   |                                     |
| Fan to Flywheel Engine.....                               | 2900 (1270)                         |
| Heat Exchanger Cooled Engine.....                         | 3030 (1374)                         |
| <b>Wet Weight</b>   |                                     |
| Fan to Flywheel Engine.....                               | 2914 (1322)                         |
| Heat Exchanger Cooled Engine.....                         | 3204 (1453)                         |
| <b>Moment of Inertia of Rotating Components</b>           |                                     |
| • with FW 1109 Flywheel.....                              | 118.5 (4.39)                        |
| • with FW 1001 Flywheel.....                              | 180.3 (7.80)                        |
| Center of Gravity from Rear Face of Flywheel Housing..... | 27.7 (704)                          |
| Center of Gravity above Crankshaft Centerline.....        | 5.5 (140)                           |

**Fuente:** Contratista de Generación Power Group

Antes de comenzar la prueba con los combustibles se verifica el estado físico del motor en tres etapas de la prueba.

La primera etapa antes de comenzar la prueba es saber en qué condiciones iniciales se encontraba el motor para dar inicio a la prueba:

Antes de dar comienzo a la prueba se realizó el desarme de algunas partes del motor para observar su estado inicial, en la inspección inicial se encuentra lo siguiente:

**Figura 8.** Equipo electrógeno PG-645



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 9.** Cabeza del pistón CYL6 y CY5



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 10.** Aspecto interno CYL6 y CYL5



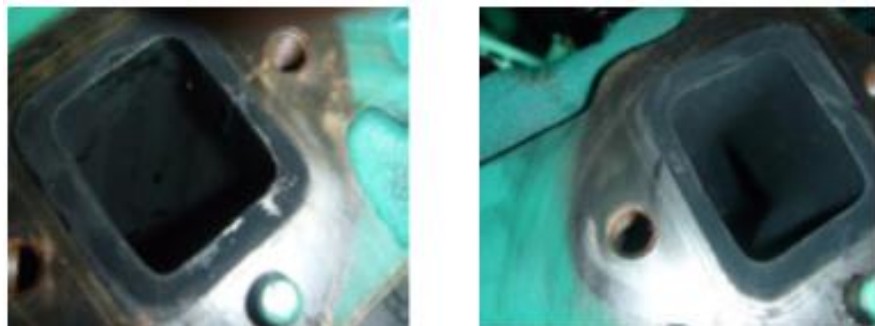
**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 11.** Desmonte de la culata CYL5 y CYL6; válvulas de admisión y escape CYL



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 12.** Galería de escape múltiple CYL5 y CYL6



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

Como se pudo observar en las fotografías el motor se encuentra en perfectas condiciones salvo a la galería de escape múltiple CYL5 y CYL6 las cuales presentan presencia de hollín.

### 3.5.5 Inspección del motor 600 Horas con Biodiésel

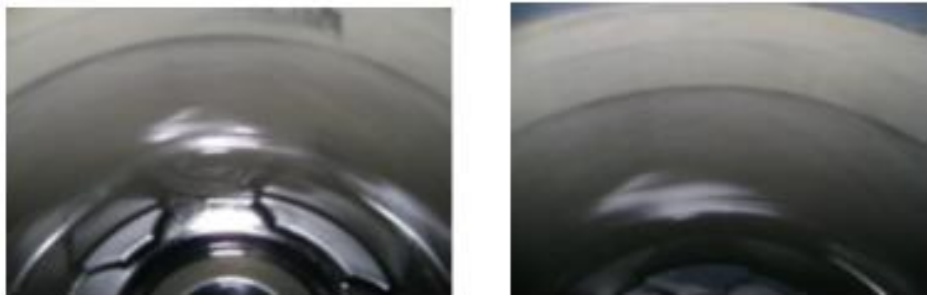
A continuación se reporta la segunda revisión realizada al motor a las 622 Hrs donde se describe lo siguiente:

**Figura 13.** Estado corona de pistón CYL5 y CYL6



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 14.** Estado interno de la pared de la camisa del cilindro CYL4 y CYL3



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 15.** Estado interno de la pared de la camisa del cilindro



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

Como se pudo observar en las fotografías el motor se encuentra en perfectas condiciones.

### **3.5.6 Inspección del motor 1500 horas con Fuel Oil Light No. 4**

A continuación se reporta la tercera revisión realizada al motor a las 1500 Horas de operación en donde se describe lo siguiente:

**Figura 16.** Corona pistón CYL6 y CYL5



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 17.** Cilindros 3, 4,5 y 6



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 18.** Válvulas de Admisión y escape CYL5 y CYL6.



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

Como se pudo observar en las fotografías el motor presenta presencia de combustible en las coronas del pistón y estado interno de la camisa CYL5, también se evidencia marcas de combustible en los inyectores.

El fabricante de motores CUMMINS garantiza el buen funcionamiento de los motores, si se tienen en cuenta estas especificaciones de combustible, al igual hace

aclaración que los combustibles que cumplan con solo estas especificaciones no necesariamente aumentan la eficiencia, fiabilidad, funcionamiento de los motores.

Teniendo en cuenta los requerimientos por parte del fabricante del motor, se realizó las comparaciones entre las propiedades del combustible biodiésel y el Fuel Oil Light No 4, con el fin de establecer cuál de los dos combustibles conviene más para tener un óptimo desempeño y funcionamiento del motor CUMMINS.

**Tabla 8.** Comparación de propiedades

| DESCRIPCION             | UNIDADES | BIODIESEL B7 | FUEL OIL LIGHT No. 4 | MOTOR CUMMINS    |
|-------------------------|----------|--------------|----------------------|------------------|
| Viscosidad a 40°C       | cTS      | 1,9          | 5                    | 1,3 Min -5,8 Max |
| Densidad                | Kg/m3    | 860-900      | 855-879              | 816-876          |
| Cenizas                 | % Peso   | 0,02         | 0,01                 |                  |
| Contenido de Agua       | ppm      | 500          | 200                  | 500              |
| Numero Cetano           |          | 55 min       | 51 min               | 42 min           |
| Indice Cetano           |          | 49,22        | 47,85                |                  |
| Oxidacion               | mg/l     | 6 min        | 25 Max               |                  |
| Corrosion al Cobre      |          | 1a           | 1a                   |                  |
| Contenido de Azufre     | ppm      | 10 Max       | 123 Max              | 123 Max          |
| Residuo Carbonoso (10%) | %        | 0,3 Max      | 1 Max                |                  |
| Punto de Fluidez        | °C       | -15          | 12                   |                  |
| Flash Point             | °C       | 65 Min       | 91Min                |                  |
| Cloud Point             | °C       | Reportar     | Reportar             | 6                |
| Poder Calorifico        | BTU/gal  | 129.327,63   | 132.517,92           |                  |

**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

En este caso, el poder calorífico del biodiésel, es menor que el del Fuel Oil Light No.4, esto se traduce que con el biodiésel es necesario tener un mayor consumo de combustible para realizar el mismo trabajo. El poder calorífico del Fuel Oil Light No.4, tiene la capacidad para generar mayor cantidad de energía al producirse la reacción química de oxidación.

El Flash Point que es la temperatura, a una presión determinada, a partir de la que el combustible puede iniciar la combustión, y generar la energía suficiente para mantener la combustión, el Fuel Oil Light No.4, muestra que es necesario que alcance una temperatura mayor, que la del Biodiésel, para poder iniciar la combustión dentro de la recámara y poder mantenerla con la energía desprendida del proceso químico.

Al tener un mayor Flash Point y un mayor poder calorífico el combustible Fuel Oil Light No.4, nos está generando una mayor ganancia de potencia, pero a su vez, también mayor temperatura en el proceso de combustión (gases de escape) y dilución de combustible del aceite. (Combustión incompleta).

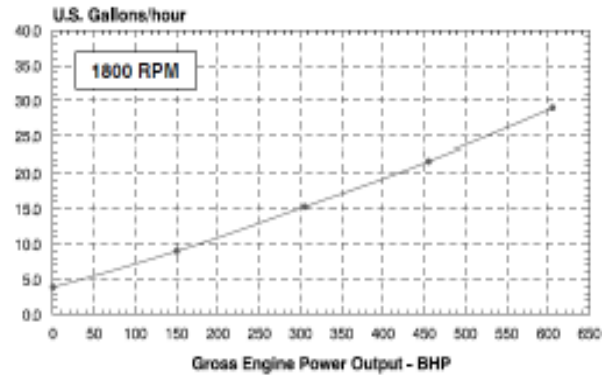
La lubricidad del combustible, es un factor importante para la durabilidad de los componentes del sistema de inyección, en particular la bomba y los inyectores pueden estar lubricados solo por medio del combustible; el biodiésel y el Fuel Oil Light No.4, tienen un comportamiento parecido en viscosidad dependiendo de la temperatura del fluido.

Uno de los contaminantes más importante de los combustibles es el azufre. El azufre sale por el conducto de escape como óxido de azufre (SO<sub>x</sub>), el cual con la humedad del aire se convierte en ácido sulfúrico, contribuyendo a la generación de lluvia ácida; observando la comparación de la tabla, se puede deducir que el combustible Fuel Oil Light No.4, es más contaminante que el Biodiésel, claro que dentro de los parámetros permitidos.

**Figura 19.** Consumo de combustible

**Engine Performance Data @ 1800 RPM**

| OUTPUT POWER   |     |     | FUEL CONSUMPTION |                |                   |              |
|--|-----|-----|------------------|----------------|-------------------|--------------|
| %  | kWm | BHP | kg/<br>kWm-h     | litre/<br>hour | U.S. Gal/<br>hour | lb/<br>BHP-h |
| <b>STANDBY POWER</b>                                   |     |     |                  |                |                   |              |
| 100  | 451 | 605 | 0.200            | 110            | 29.1              | 0.342        |
| 75   | 339 | 455 | 0.210            | 84             | 22.1              | 0.344        |
| 50   | 228 | 305 | 0.224            | 60             | 15.9              | 0.370        |
| 25   | 112 | 150 | 0.273            | 36             | 9.1               | 0.431        |
| <b>CONTINUOUS POWER</b>                                |     |     |                  |                |                   |              |
| <i>Not Available for Continuous Power Applications</i> |     |     |                  |                |                   |              |
| <b>PRIME POWER</b>                                     |     |     |                  |                |                   |              |
| <i>Not Available for Prime Power Applications</i>      |     |     |                  |                |                   |              |



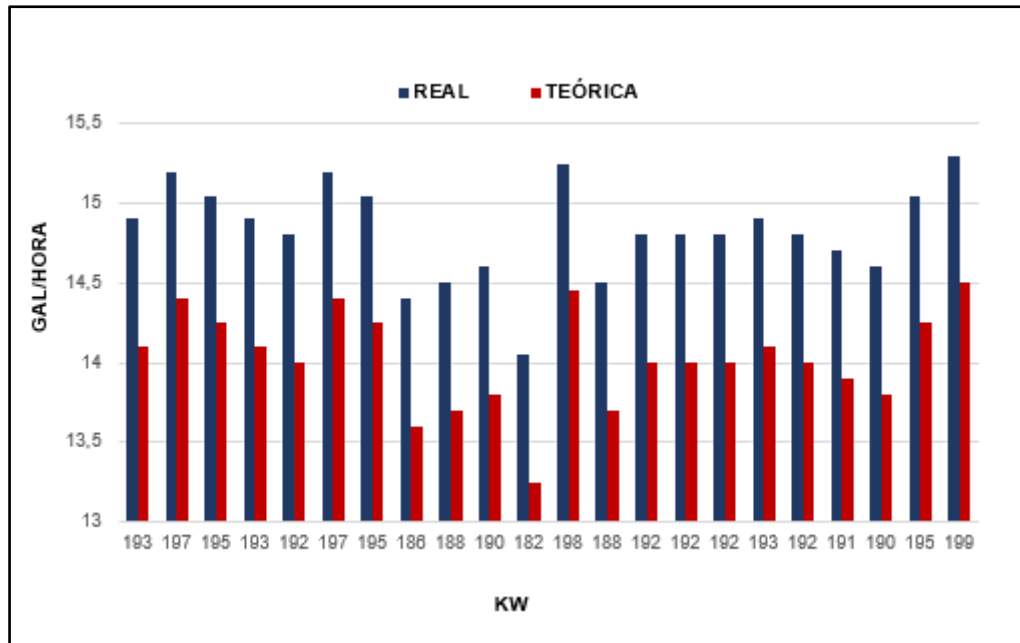
**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

Con un porcentaje de carga promedio del 69% (192KW), el consumo normal de este equipo debería estar en 14 Gal/Hr, según los datos de las especificaciones del fabricante del motor.

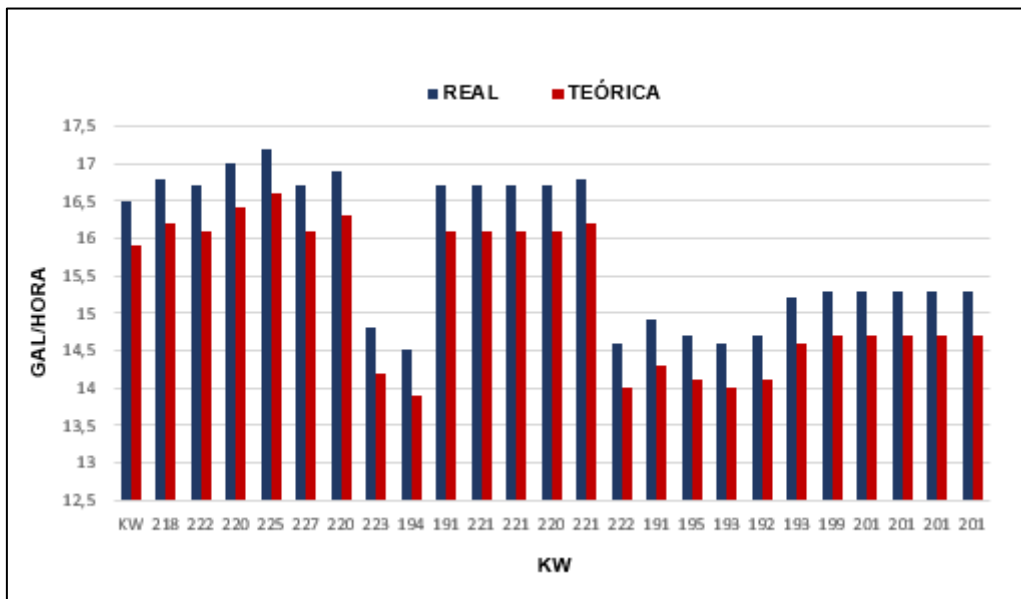
Según la medición realizada por el medidor de paso de combustible, el consumo fue de 14.8 Gal/Hr con el Biodiésel durante las primeras 600 horas de operación continua a un 69% de la carga. Durante las primeras 600 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, la carga aumento en un 10%, con respecto a la prueba realizada con el Biodiésel, esto quiere decir que el porcentaje de carga con el segundo combustible fue del 79% (218KW). Según la gráfica de la especificación de consumo del motor, con un porcentaje del 79% de carga, este motor debió consumir 15,2 Gal/Hr.

Con la medición tomada del medidor de paso de combustible, el consumo promedio fue de 15,8 Gal/Hr con el Fuel Oil Light No.4, durante las primeras 600 horas de operación a un 79% de la carga. Con la prueba del Biodiésel, el motor consumió 0,8 Gal/Hr más de lo indicado por el fabricante; con la prueba del Fuel Oil Light No.4 el motor consumió 0,6 Gal/Hr más de lo indicado.

**Figura 20.** Consumo de Biodiésel a las 600 horas de operación



**Figura 21.** Consumo de Fuel Oil Light No.4 a las 600 horas de operación.



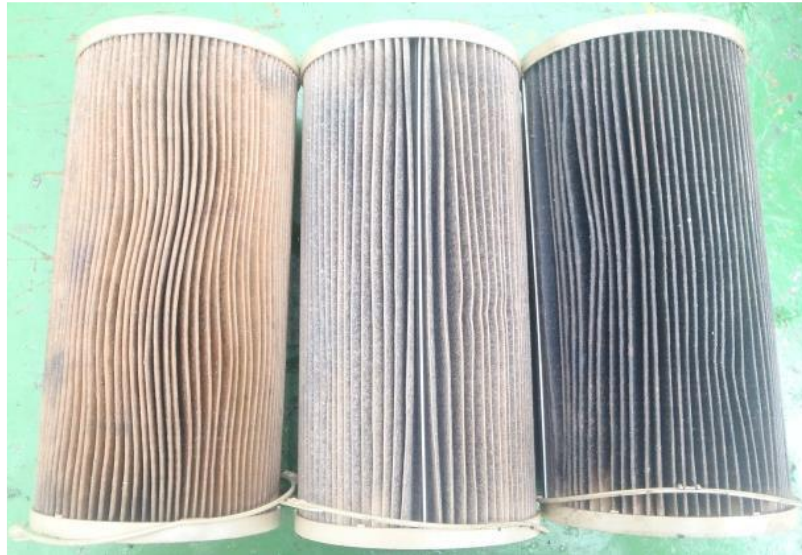
**Tabla 9.** Comportamiento de consumo de Filtros

| PLAN DE SEGUIMIENTOS DE FILTROS | CAMBIO EN HORAS BIODIESEL            |     |     |     |     |      |      |      |     | PROMEDIO Hrs |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|--------------|
| HORAS                           | 66                                   | 208 | 218 | 315 | 410 | 510  | 602  | 622  | 556 |              |
| ACEITE SHEEL RIMULA R3          |                                      |     | 44  |     |     |      |      | 44   | 88  |              |
| FILTRO DE ACEITE                |                                      |     | 1   |     |     |      |      | 1    | 2   | 278          |
| FILTRO DE AIRE                  |                                      |     |     |     |     |      |      |      | 0   | 0            |
| FILTRO DE COMBUSTIBLE PRIMARIO  |                                      |     | 2   |     |     |      |      | 2    | 4   | 278          |
| FILTRO SEPARADOR TRAMPA RACOR   | 1                                    | 1   |     | 1   | 1   | 1    | 1    |      | 6   | 93           |
| PLAN DE SEGUIMIENTOS DE FILTROS | CAMBIO EN HORAS FUEL OIL LIGHT No. 4 |     |     |     |     |      |      |      |     | PROMEDIO Hrs |
| HORAS                           | 717                                  | 766 | 831 | 859 | 892 | 1104 | 1251 | 1383 | 621 |              |
| ACEITE SHEEL RIMULA R3          |                                      |     | 44  | 4   |     |      |      |      | 54  |              |
| FILTRO DE ACEITE                |                                      |     | 1   |     |     | 1    | 1    |      | 3   | 222          |
| FILTRO DE AIRE                  |                                      |     |     | 1   |     | 1    |      |      | 2   | 333          |
| FILTRO DE COMBUSTIBLE PRIMARIO  |                                      |     | 1   |     |     | 2    | 2    | 1    | 6   | 111          |
| FILTRO SEPARADOR TRAMPA RACOR   | 1                                    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    |      | 7   | 95           |

**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

Analizando la tabla 9, se puede observar el comportamiento en consumo de filtros con ambos combustibles utilizados en la prueba, y se puede notar que con el combustible Fuel Oil Light No.4, el consumo promedio por horas de los filtros de aceite y combustible es mayor que con el combustible Biodiésel, caso contrario de lo que ocurre con el filtro separador racor de combustible, quiere decir que el Fuel Oil Light No.4 genera un mayor cambio de filtros entre periodos aumentando los costos de filtración de aceite y combustible pero disminuyendo los de filtración del separador racor.

**Figura 22.** Consumo de Filtros



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

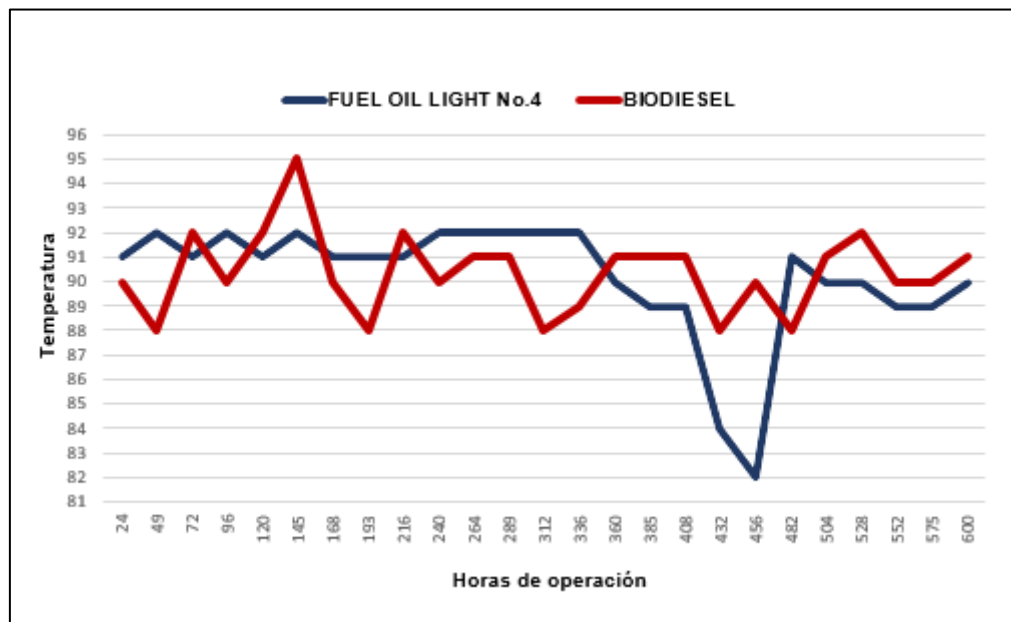
De izquierda a derecha. Filtro separador externo Racor con combustible Biodiésel, filtro separador externo Racor con mezcla de BIODIÉSEL y Fuel Oil Light No.4, filtro separador externo con combustible Fuel Oil Light No.4.

### **3.5.7 Reporte Telemetría, Comportamiento en Sensores y Carga**

La telemetría es un soporte tecnológico que posee la empresa para lograr el monitoreo de cada una de la plantas en tiempo real y remotamente, por medio de esta herramienta tecnológica podemos monitorear todas las variables del grupo electrógeno ,(presiones, temperaturas, niveles, voltajes, corrientes, potencias y factores, velocidad, frecuencia y horometro), al igual podemos generar registros de comportamiento de cada una de las variables, generar gráficas y análisis, esta herramienta nos permite también intervenir más rápidamente, eficazmente y oportunamente a los problemas que se puedan presentar en el comportamiento de la plantan ayudándonos a analizar y atacar eficientemente el problema.

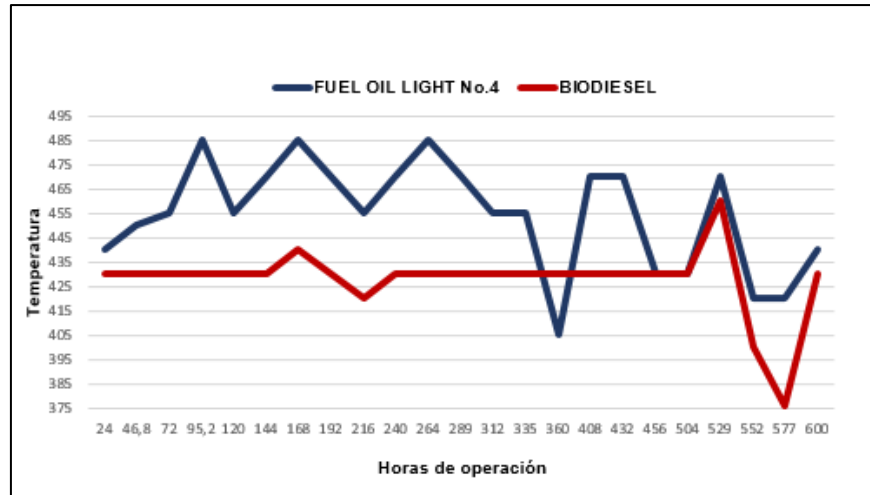
Para este informe se han utilizados los datos reales tomados del sistema de telemetría de la planta en prueba, a continuación se muestra una comparación del comportamiento e incidencia en el equipo de algunas variables de interés con la utilización de los dos tipos de combustibles.

**Figura 23.** Temperatura del Motor



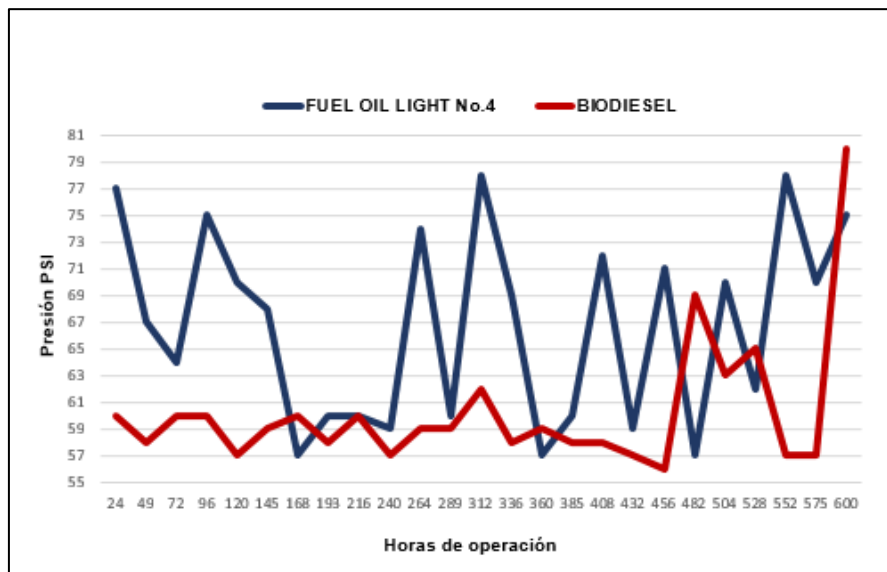
Durante las primeras 600 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, la temperatura del motor oscilo entre 88°C y 92°C, con un valor promedio de 90°C, se nota un comportamiento bastante estable en la temperatura, los valores de esta variable fueron iguales con el Biodiésel que presento un valor promedio de 90°C, esto nos indica que la temperatura no aumento con respecto a la primera prueba con Biodiésel.

**Figura 24.** Temperatura Gases de Escape



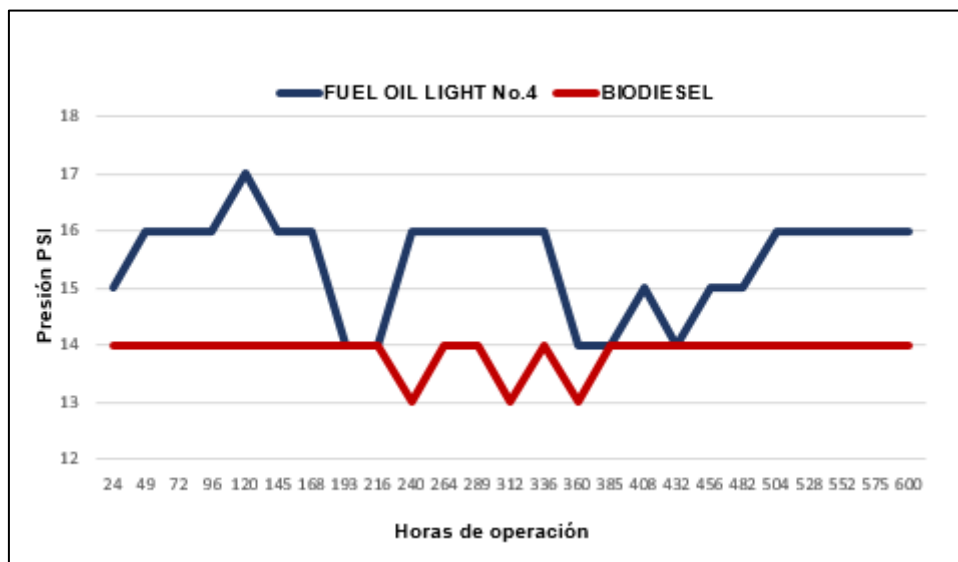
En las primeras 300 horas del combustible Fuel Oil Light No.4, la temperatura de gases de escape mantuvo un rango entre 440°C y 486°C, con un promedio de 465°C, realizando la primera comparación se observa que la temperatura con Biodiésel es menor con un valor promedio de 430°C, esto nos indica que la temperatura aumento en un 8% con respecto a la prueba con Biodiésel.

**Figura 25.** Presión de Aceite



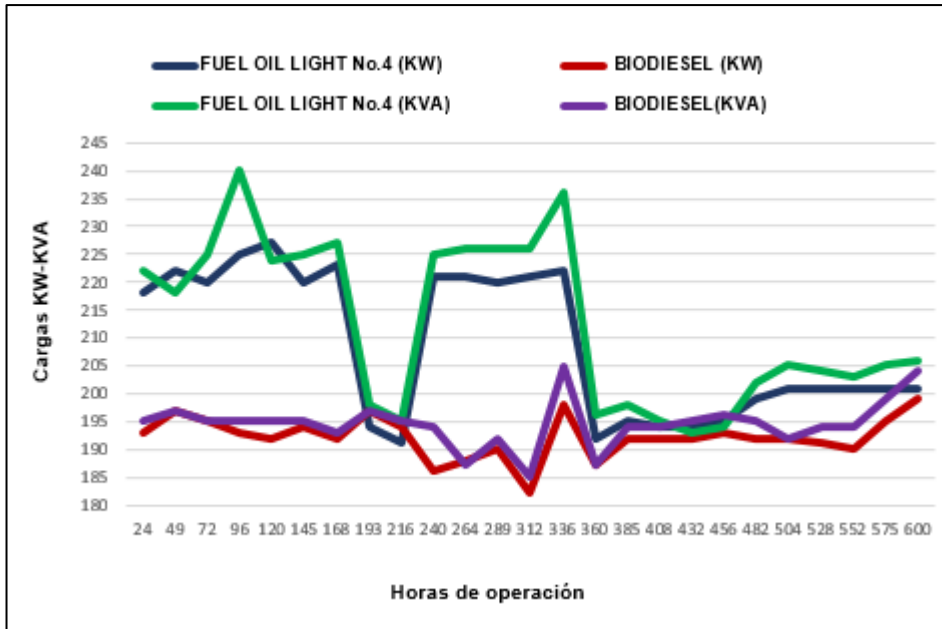
La presión de aceite con el combustible Fuel Oil Light No.4, en las primeras 600 horas de operación continúa, oscilo entre 57 psi y 78 psi, con un valor promedio de 67 psi, el comportamiento de la presión fue mayor, y menos estable a comparación de las primeras 600 horas con el BIODIÉSEL, que tuvo un valor promedio de 59 psi, esto nos indica que la presión aumento en un 13% con respecto a la prueba con BIODIÉSEL.

**Figura 26.** Presión turbo



A cargas constantes la presión del turbo es contante, para una carga del 79 %, la presión del turbo fue en promedio 16 psi con las pruebas del combustible Fuel Oil Light No.4, mientras que con el BIODIÉSEL con una carga del 69% la presión del turbo fue en promedio 14 psi, esto nos indica que la presión aumento en un 14% con respecto a la prueba con BIODIÉSEL.

Figura 27. KW- KVA



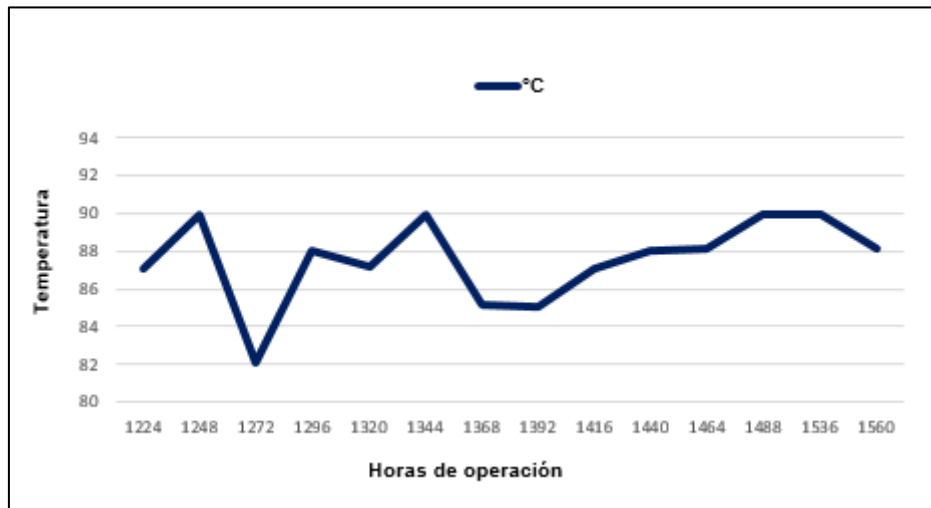
En las primeras 600 Hr. de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, el equipo ha operado con una carga promedio de 218 KW, con una mínima de 191 KW y una Máxima de 227 KW, el promedio de carga con el BIODIÉSEL fue de 192 KW, esto nos indica que la carga con Fuel Oil Light No.4 aumento en un 10% con respecto a la carga con el BIODIÉSEL.

Hay que tener en cuenta que el aumento de la carga afecta el comportamiento de diferentes variables dentro del grupo electrógeno, entre las más afectadas se encuentra la presión y la temperatura de operación.

Últimas 300 Horas de operación Fuel Oil Light No.4

Análisis de variables mediante la telemetría de las últimas 300 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4.

**Figura 28.** Temperatura del Motor en las últimas 300 horas



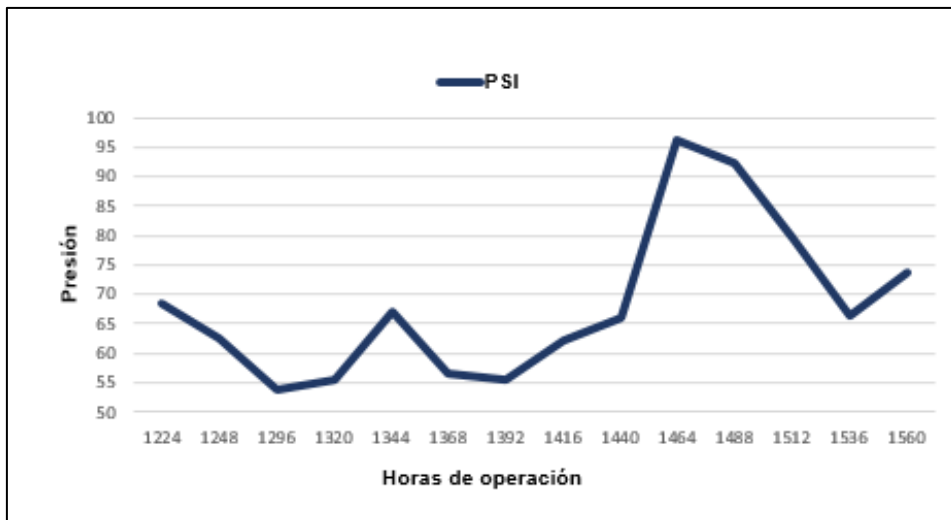
Durante las últimas 300 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, la temperatura del motor oscilo entre 82°C y 90°C, con un valor promedio de 87,6°C, en estas últimas 300 horas de operación el promedio de la temperatura bajo con respectos a los análisis anteriores.

**Figura 29.** Temperatura de gases de Escape en las últimas 300 horas



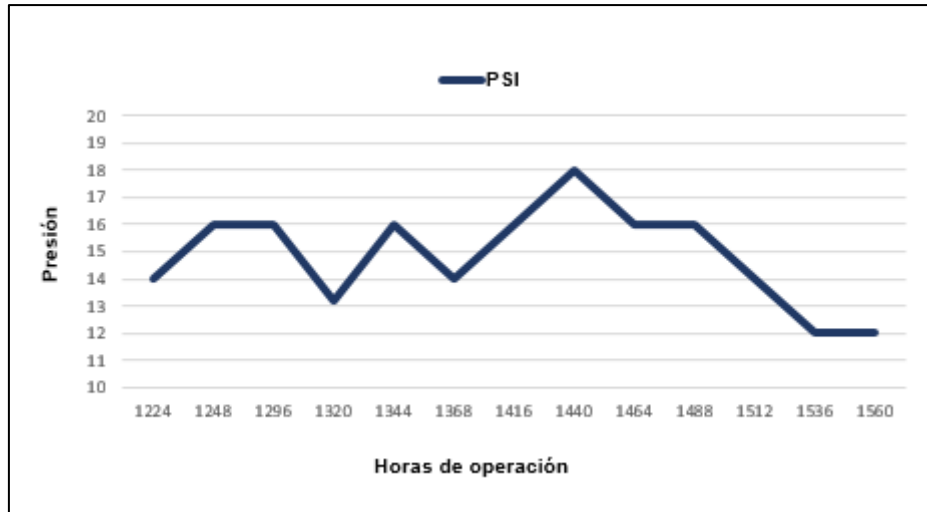
Durante las últimas 300 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, y con un promedio de carga del 216 KW, la temperatura de gases de escape oscilo entre 409 °C y 440 °C, con un promedio de 422°C, comparado este datos con los anteriores, aún sigue siendo más alta la temperatura con el Fuel Oil Light No.4.

**Figura 30.** Presión de Aceite en las últimas 300 horas



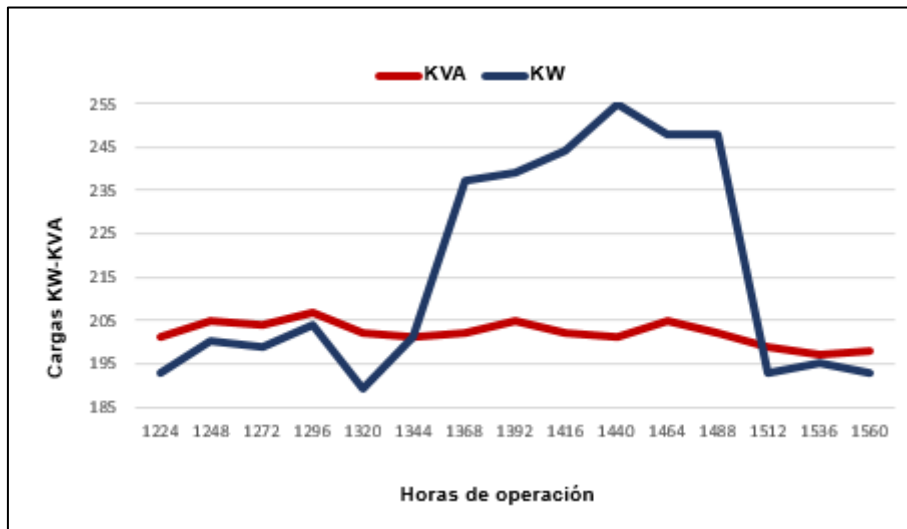
La presión de aceite con el combustible Fuel Oil Light No.4, en las últimas 300 horas de operación continúa, oscilo entre 54 psi y 97 psi, con un valor promedio de 68 psi, el comportamiento de la presión fue mayor a comparación de los análisis anteriores, esto puede deberse a que la temperatura del motor en esta prueba también fue más bajas, produciendo que el aceite sea más viscoso.

**Figura 31.** Presión Turbo en las últimas 300 horas



Con un promedio de carga del 78.5% en las últimas 300 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, la presión del turbo mantuvo una variación entre 12 PSI y 18 PSI con un valor promedio de 14.8 PSI comparando los datos con las pruebas anteriores, se observa un comportamiento igual a las primeras 300 horas de operación con el Fuel Oil Light No.4 ya que el promedio de carga es muy similar.

**Figura 32.** KW-KVA en las últimas 300 horas



En las últimas 300 horas de operación con el combustible Fuel Oil Light No.4, el grupo electrógeno ha trabajado con una variación de carga entre 190 KW y 256 KW, con un promedio de carga de 216 KW y con una capacidad promedio del equipo del 78.5%, comparando estos datos con las primeras 600 horas de operación con el Fuel Oil Light No.4, se observa que el promedio de carga es muy similar

### 3.5.8 Análisis de Gases y Vapores

En este análisis se presentan los resultados obtenidos en las evaluaciones de (CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y LEL) realizadas en el grupo electrógeno PG-645 ubicado en el Pozo 1 de Campo en estudio.

El objetivo es determinar las concentraciones de monóxido de carbono y otros gases explosivos en desarrollo de las labores y tareas del grupo electrógeno.

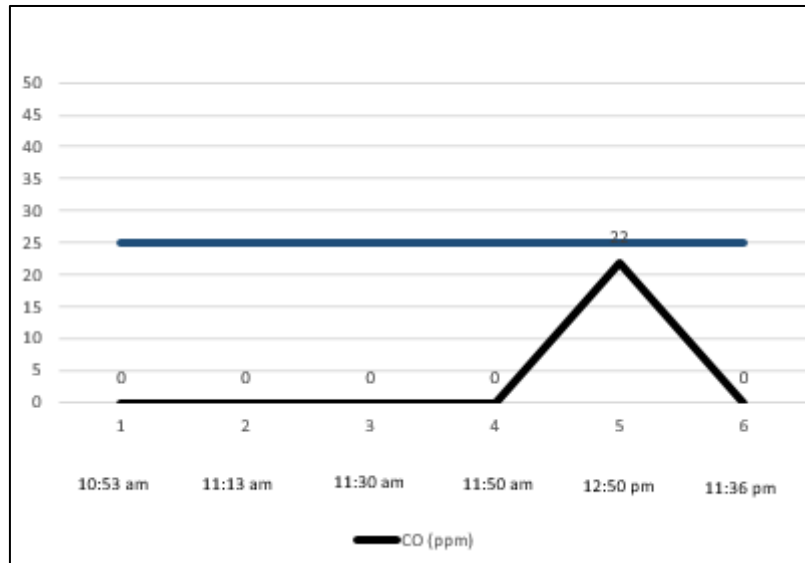
En el Generador se realizaron las mediciones con los métodos y criterios aplicados que corresponden a los establecidos por los organismos especializados en la Administración y Control de la Seguridad y Salud Ocupacional como NIOSH (National Institute for Occupational Safety Health) y OSHA (Occupational Safety Health Administration). Los resultados de las evaluaciones se comparan con los valores límites permisibles (TLV's) para el periodo de la jornada laboral.

Tabla 10. Límites contaminaste Gas

| CONTAMINANTE O GAS PRESENTE | VALOR LÍMITE PERMISIBLE (TLV) | VALOR LÍMITE PERMISIBLE (TLV) corregido |
|-----------------------------|-------------------------------|---|
| Monóxido de carbono (CO)    | 25 ppm                        | 10,41 ppm                               |
| H <sub>2</sub> S            | 10 ppm                        | 4,17 ppm                                |
| LEL                         | 50%                           | N.A.                                    |
| O <sub>2</sub>              | 20,90%                        | N.A.                                    |

**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

**Figura 33.** Comportamiento del CO



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

### 3.5.9 Análisis de la Prueba Realizada

De acuerdo con el análisis realizado a los resultados obtenidos y que son relacionados y evaluados se concluye que en ninguna de las áreas de rastreo se encontraron niveles peligrosos de gases o deficiencia de oxígeno que puedan afectar la salud de las personas.

Se termina la prueba con 1500 Hrs de operación, las primeras 600 Hrs se operó el equipo con combustible Biodiésel B7, y las otras 900 Hrs se ha venido operando con combustible Fuel Oil Light No.4, a continuación resumimos las conclusiones de la operación del motor con ambos combustibles:

La operación del motor, con respecto a los parámetros monitoreados, muestra lo siguiente:

- La temperatura del motor nos indica un comportamiento estable durante la prueba tanto con el uso del BIODIÉSEL como con el Fuel Oil Light No.4. En el seguimiento se detectó tendencia a elevarse la temperatura en las primeras horas de uso del Fuel Oil Light No.4, sin embargo esta tendencia se regulo y se estabilizo, con respecto al BIODIÉSEL.
- La temperatura de Gases de escape al final de la prueba presento, un comportamiento mayor con el Fuel Oil Light No.4, debido a las mismas características del combustible, las cuales son proporcionales a la carga puesta al equipo.
- Los demás parámetros como Presión de aceite, Presión del Turbo, aumentan proporcionalmente a la carga sobre el equipo y son relativamente iguales con carga similar.
- El comportamiento en filtración de combustible con filtro RACOR, tuvo cambios, inicialmente entre el Biodiésel y Fuel Oil Light No.4, el consumo aumento en promedio de 93Hrs a 44 Hrs de uso, debido al aumento en la cantidad de hollín en el sistema, pero los resultados finales dan cuenta de un consumo de 95 Hrs entre cambio, siendo muy parecido con el uso del Biodiésel.
- Las muestras de aceite reportaron diluciones de combustible con el uso del Fuel Oil Light No.4, y aumento en el ppm del Hollín, no hay cambios significativos en la viscosidad y TBN, sin embargo debido a la inspección final, realizada a los componentes de potencia, donde se encuentra alta

acumulación de combustible sin quemar, se recomienda realizar cambios a menos Horas de operación.

- La presencia de combustible y hollín en el aceite, es factible ya que el Fuel Oil Light No.4, presenta un punto de inflamación más alto que el Biodiésel, y necesita mayor temperatura para formar una mezcla inflamable con el aire de la cámara. esto es aún más sensible a cargas bajas de motor donde generalmente se encuentra, disminución en la temperatura de la cámara de combustión.
- Las características del Fuel Oil Light No.4, ocasionan que el motor presente combustión incompleta que en la práctica, realizando labores de calibración más continuamente, mejoran en buena medida la dilución de combustible en el aceite y disminuyen la generación de hollín, sin embargo esto produce un aumento sensible en los costos de mantenimiento.
- El comportamiento del consumo de combustible se midió con respecto a lo teórico de acuerdo a la ficha técnica del motor, con Fuel Oil Light No.4 se detectó una confiabilidad mayor entre lo real y lo teórico con una diferencia de 0.6 Gal/Hr, mientras que el BIODIÉSEL presento una diferencia de 0.8 Gal/Hr, lo cual nos indica que con el Fuel Oil Light No.4 tendremos un consumo mejor de combustible en condiciones óptimas de calibración del motor.
- La acumulación de combustible sin quemar, en el sistema de inyección genera alto carbonamiento y rápido taponamiento de los inyectores, lo cual hace necesario una limpieza continua del sistema de inyección, para ello es necesario, desmontar el sistema y enviarlo al banco más continuamente.

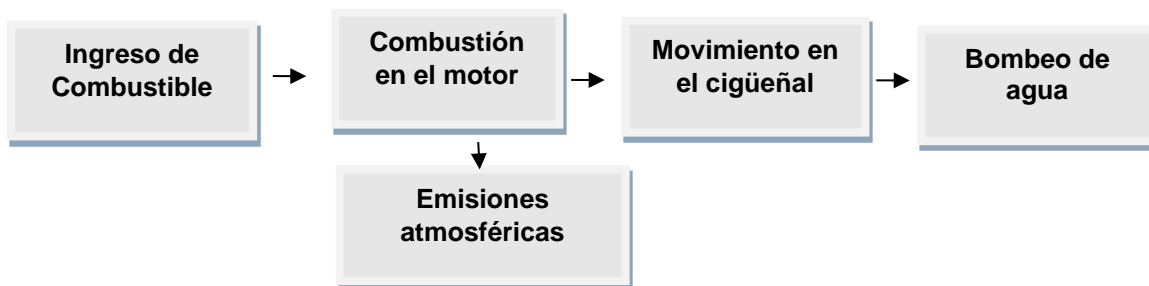
### 3.6 PRUEBAS DE EMISIONES AMBIENTALES

Después de evaluar el funcionamiento del motor con Fuel Oil Light No.4 y el Biodiésel y demostrar que el Fuel Oil Light No.4 opera dentro de los rangos permitidos, se procede a realizar un análisis de en emisiones ambientales con el fin de corroborar su uso.

El tipo de proceso llevado a cabo es una combinación de fenómenos físicos y químicos en la cual la energía mecánica generada en el proceso químico de combustión es posteriormente transformada en energía eléctrica y distribuida al área requerida.

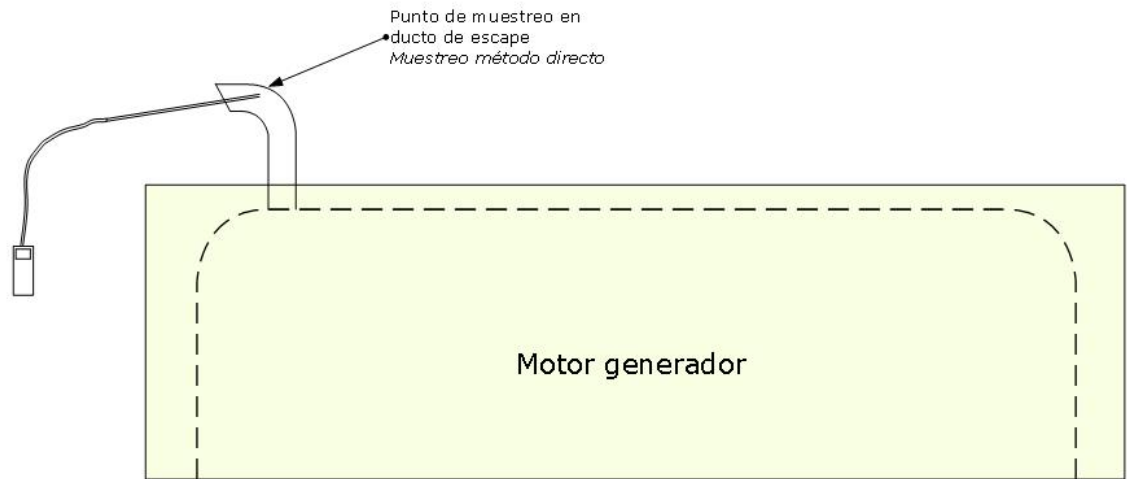
En el proceso, la combustión de la mezcla de hidrocarburos se aprovecha en forma de energía mecánica, la cual se obtiene del giro de un cigüeñal que transmite el movimiento del eje a un generador electromagnético, el cual por acción de un imán produce energía eléctrica que posteriormente es distribuida.

**Figura 34.** Esquema básico de operación de los motores generadores.



A continuación se presenta la Figura 35 donde se muestra el punto de toma de muestra tanto en el ducto de escape del motor.

**Figura 35.** Descripción de los puntos de medición de oxígeno en las fuentes de emisión.



**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

A continuación se presentan imágenes relativas a la medición de gases de combustión mediante análisis instrumental.

### 3.6.1 Descripción del Programa de Medición

Estas actividades de monitoreo y caracterización de gases de combustión se realizaron a las siguientes fuentes.

**Tabla 11.** Identificación general del motor del Generador

| Items            | Power Group PG-645 |
|------------------|--------------------|
| <b>Modelo</b>    | NTA855-G3          |
| <b>Capacidad</b> | 275 KW             |
| <b>Serie</b>     | NA                 |

### 3.6.2 Procedimiento de Evaluación

La evaluación de contaminantes es realizada mediante equipos debidamente calibrados y certificados. A continuación se da una descripción de los equipos utilizados en la toma de muestra y una descripción de los procedimientos realizados en la toma y análisis de los resultados.

### 3.6.3 Descripción de Equipos y Análisis

A continuación en la tabla 12 se presenta una lista de los equipos utilizados para la toma de la muestra de gas relacionada con la medición directa del parámetro evaluado.

**Tabla 12.** Equipos utilizados para la toma de muestras

| EQUIPO              | DESCRIPCIÓN   |
|---------------------|---|
| Analizador de gases | Analizador de gases de combustión<br>Marca Bacharach PCA 3<br>Marca Testo |
| Kit de opacidad     | Smoke Test Kit<br>Marca Bacarach  |
| Cámara fotográfica  | Cámara Kodak EasyShare<br>SN: KCGKP3006457                                |
| Sonda               | Sonda en acero inoxidable de 1,7m   |

**Fuente:** Área de Mantenimiento del Campo en estudio

### **3.6.4 Métodos de Toma de Muestra y Análisis**

Las metodologías de monitoreo y evaluación de fuentes fijas de emisión de contaminantes atmosféricos utilizadas son las recomendadas por la US EPA (Environmental Protection Agency of the United States).

Los métodos de evaluación directa aquí expuestos, se utilizan para la determinación de emisiones atmosféricas en ductos o chimeneas de equipos que cumplen los parámetros mínimos requeridos por los métodos EPA para la ejecución de los mismos. Dichos parámetros están relacionados con la geometría y dimensiones mínimas de los ductos y con las condiciones de estado y flujo estable de los procesos de combustión.

Los datos obtenidos en campo son consignados digitalmente con el fin de mantener y demostrar la trazabilidad de los valores obtenidos.

### **3.6.5 Determinación del contenido de oxígeno del gas (Método EPA 3A)**

Se calcula el peso molecular seco del gas de chimenea mediante su composición Orsat, es decir, determinando su contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). Se toman varias muestras puntuales durante una hora y se determina el promedio.

$$PM = 0,44x (\% \text{ CO}_2) + 0,32x (\% \text{ O}_2) + 0,28x (\% \text{ CO}) + 0,28x (\% \text{ N}_2)$$

El porcentaje de nitrógeno ( $N_2$ ) se obtiene de restar al 100%, el porcentaje de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el porcentaje de oxígeno ( $O_2$ ) y el porcentaje de monóxido de carbono (CO).

El equipo utilizado posee celdas electroquímicas selectivas que detectan las trazas de los compuestos deseados, mediante el paso de la corriente de gas de combustión por las celdas.

### **3.6.6 Determinación de la opacidad del gas de combustión**

Para la determinación de la opacidad de los gases de salida, se utiliza la metodología soportada por la norma ASTM D2156-65 (prueba de opacidad de humo), como también por la norma europea DIN 51-402; por medio del equipo Bacharach® Smoke Test Kit, el cual consiste en un dispositivo que bombea una muestra de gas sobre un medio filtrante con el fin de analizar cualitativamente el comportamiento de la fuente de emisión en base a la opacidad aparente de la muestra y su comparación con una escala determinada.

De acuerdo a la literatura referenciada para este método, dependiendo del valor de opacidad relacionado por el equipo se puede encontrar una relación con el desempeño de la fuente de combustión. Esta relación se presenta en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Efecto de la opacidad en el desempeño de la fuente de combustión.

| VALOR DE OPACIDAD | VALORACIÓN | HOLLÍN PRODUCIDO  |
|-------------------|------------|---|
| 1                 | Excelente  | Generación extremadamente ligera  |
| 2                 | Buena      | Hollín leve; puede que no aumente considerablemente la temperatura de la chimenea |
| 3                 | Regular    | Se puede generar algo de hollín; rara vez requiere más de una limpieza al año     |
| 4                 | Pobre      | Condición límite; el equipo requerirá más de una limpieza al año                  |
| 5 o mayor         | Muy pobre  | Generación rápida y densa de hollín. Revisión de las condiciones de operación.    |

**Fuente:** Combustion Efficiency Tables, Harry Taplin, The Fairmont Press, inc, 1991.

Un valor alto de opacidad puede indicar una alta generación y deposición de hollín en el equipo, ocasionando un desempeño bajo en la operación del equipo por una mala combustión.

### 3.6.7 Localización del sitio de toma de muestra

La localización del sitio de toma de muestra fue ubicada al interior del ducto de escape de los gases, a una distancia de aproximadamente 30 cm respecto a la salida del ducto, con el fin que la medición corresponda al flujo de gases de emisión generado por el motor y no halla mezcla con aire del entorno.

### **3.6.8 Procedimientos de Control y Aseguramiento de Calidad**

Para asegurar el control y la calidad de la información recolectada en campo, se tienen procedimientos para el control, análisis y almacenamiento de los datos, los cuales se describen a continuación:

### **3.6.9 Procedimiento de Medición**

Se toman varias mediciones directas en el ducto de escape del motor a través de la salida del ducto a una distancia de 30cm, por un periodo de una hora, con el fin de obtener un histórico del comportamiento del motor generador.

### **3.6.10 Equipos de Calibración Externa y Verificación en Laboratorio**

Se realiza una verificación del equipo de medición por medio del análisis de gases patrón de concentración conocida y certificada, con una lectura por triplicado de la muestra de gases.

El criterio de aceptación de la verificación está dado por un rango mínimo y máximo, como se muestra a continuación:

Rango mínimo:

$$\text{Rango menor} = A - (0,02 A) - 0,5$$

Rango Máximo:

$$\text{Rango mayor} = A + (0,02 A) + 0,5$$

Donde:

A= Concentración del gas patrón en volumen (%)

Este procedimiento se realiza cada seis meses, con el fin de asegurar que el equipo está operando a las condiciones establecidas en la última calibración.

Para la verificación de equipos se debe tener en cuenta la Guía de Especificación de Equipos aplicada en el sistema de gestión, y los siguientes formatos de acuerdo a cada equipo o elemento de muestreo:

- Verificación de oxígeno y dióxido de carbono en analizadores.

Las verificaciones se consignan en el Historial del equipo correspondiente, con el fin de identificar su desempeño dentro de los rangos y establecer acciones preventivas oportunas.

La verificación se realiza utilizando patrones, según el Programa de mantenimiento, verificación y calibración de equipos donde aparecen los equipos que deben ser verificados, el patrón de referencia con las medidas y especificaciones que deben presentar los dispositivos y la frecuencia de verificación de estos. No obstante, se hace una revisión periódica de la normatividad vigente en cuanto a las exigencias de los equipos para dar cabal cumplimiento a los requisitos legales requeridos.

De acuerdo a los resultados de la verificación periódica del equipo, si muestra un comportamiento no aceptable, éste debe rotularse como “Fuera de servicio”, como medida de aseguramiento para evitar la generación de datos no confiables fuera de tendencia.

En caso de que el equipo “Fuera de servicio” haya sido utilizado para alguna medición, se levanta una no conformidad y se realiza el tratamiento que corresponda como se establece en el procedimiento de acciones preventivas y correctivas.

Adicional a la verificación de los equipos antes y después de las mediciones, se ejecutan actividades de limpieza y revisión del funcionamiento de estos, que se realizan con el fin de detectar y corregir fallas potenciales que pueden afectar el buen desempeño de los mismos, así como la reposición de los consumibles propios de cada equipo. Finalizado el trabajo en campo, se debe realizar limpieza de los equipos, adicionalmente en las instalaciones se asegura la realización del mantenimiento de los equipos según la frecuencia establecida en el programa de mantenimiento.

El mantenimiento correctivo consiste en la determinación y reparación de una falla detectada en el funcionamiento de un equipo y se efectúa en el momento en el que un equipo presente fallas en su funcionamiento.

Cuando se realicen actividades de mantenimiento preventivo y correctivo, se hace la actualización del historial del equipo correspondiente, teniendo en cuenta el

instructivo de lavado y mantenimiento aplicado en el sistema de gestión de la empresa.

Si el resultado del mantenimiento muestra que el equipo presenta una falla que le impide operar normalmente, el equipo se identifica como “Fuera de Servicio”, con el fin de evitar que sea utilizado hasta tanto no haya sido ajustado y/o reparado.

Los equipos utilizados por el contratista para efectuar esta prueba están debidamente calibrados externamente se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Calibración externa de equipos

| CALIBRACIÓN EXTERNA DE EQUIPOS  |                               |            |                           |              |                 |                       |
|---------------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| Equipo                          | Especificación de calibración | Fecha      | Frecuencia de calibración | Serie        | No. Certificado | Proveedor calibración |
| Analizador de gases<br>Testo    | CO, NO, NO2                   | 03/01/2015 | Anual                     | 0199046<br>1 | 334752          | Testo Inc             |
| Analizador de gases<br>Bacarach | O2, CO,NO, NO2                | 17/03/2015 | Anual                     | PCA327<br>5  | 171012-2        | Premac                |

**Fuente:** Combustion Efficiency Tables, Harry Taplin, The Fairmont Press, inc, 1991.

### 3.6.11 Validación de Datos

Para el procedimiento de validación de datos se establece un control de revisiones:

1. De los datos registrados en campo (primera revisión), se verifica que los estándares del procedimiento cumplan con los requerimientos de los métodos adoptados.
2. De las fuentes de información empleadas para la generación de resultados (segunda revisión), así como su correcta transcripción desde las hojas de resultados al informe final.

### 3.6.12 Reporte de Resultados de Análisis

Los resultados obtenidos en la evaluación de gases de combustión en el motor y generador, así como las consideraciones realizadas para alimentar los cálculos se describen a continuación.

Los reportes de salida fueron calculados empleando una hoja electrónica de cálculo. Los resultados obtenidos del estudio realizado en los motores del Cluster 1, corresponden a las fechas en las que fueron desarrolladas las actividades relacionadas.

**Tabla 15.** Resumen de los detalles relativos al muestreo.

| FUENTE DE EMISIÓN | FECHA DE EMISIÓN     |
|-------------------|----------------------|
| Generador PG-645  | 29 Diciembre de 2015 |
|                   | 08 de Febrero 2016   |

Las mediciones realizadas fueron ejecutadas con los motores operando con combustible Biodiésel B8, mientras que en las siguientes mediciones los motores operaron con combustible Fuel Oil Light No.4.

### 3.6.13 Análisis de combustión

Durante la determinación de la concentración de los gases de combustión se analizó el comportamiento de los gases de salida en un periodo de una hora; en las tabla 16, tabla 17 y tabla 18 se presentan las concentraciones de los gases evaluados.

**Tabla 16.** Concentración de gases de combustión en el Generador PG-645 Biodiésel B8 como combustible

| Medición        | Fecha      | Hora  | % Oxígeno   |
|-----------------|------------|-------|-------------|
| 1               | 29/12/2015 | 11:47 | 10,6        |
| 2               |            | 11:48 | 10,3        |
| 3               |            | 11:49 | 10,5        |
| <b>Promedio</b> |            |       | <b>10,4</b> |

**Tabla 17.** Concentración de gases de combustión en el Generador PG-645 Fuel Oil Light No.4

| Medición        | Fecha      | Hora  | % Oxígeno  |
|-----------------|------------|-------|------------|
| 4               | 08/02/2016 | 16:07 | 8,6        |
| 5               |            | 16:18 | 8,6        |
| 6               |            | 16:26 | 8,6        |
| 7               |            | 16:38 | 8,5        |
| 8               |            | 16:48 | 8,6        |
| 9               |            | 16:57 | 8,6        |
| <b>Promedio</b> |            |       | <b>8,5</b> |

**Tabla 18.** Concentración de gases de combustión en el generador PG-645

| Fecha                          | Medición | Hora  | SO <sub>2</sub> (ppm) | NO (ppm)     | NO <sub>2</sub> (ppm) | CO (ppm)      | NO <sub>x</sub> (ppm) |
|--------------------------------|----------|-------|-----------------------|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| 29/12/2015                     | 1        | 11:06 | 11                    | 1106         | 12                    | 1119          | 36                    |
|                                | 2        | 11:17 | 11                    | 1143         | 13                    | 1155          | 39                    |
|                                | 3        | 11:25 | 9                     | 1129         | 12                    | 1140          | 42                    |
|                                | 4        | 11:32 | 10                    | 1158         | 12                    | 1170          | 49                    |
|                                | 5        | 11:39 | 11                    | 1169         | 13                    | 1182          | 57                    |
| 08/02/2016                     | 1        | 16:07 | <L.D                  | 946          | 9,4                   | 955           | 129                   |
|                                | 2        | 16:18 | <L.D                  | 953          | 9,1                   | 962           | 98                    |
|                                | 3        | 16:26 | <L.D                  | 947          | 7,9                   | 955           | 87                    |
|                                | 4        | 16:38 | <L.D                  | 952          | 7,5                   | 960           | 92                    |
|                                | 5        | 16:48 | <L.D                  | 940          | 7,3                   | 948           | 92                    |
|                                | 6        | 16:57 | <L.D                  | 935          | 6,9                   | 941           | 91                    |
| <b>Promedio día 29/12/2015</b> |          |       | <b>10,4</b>           | <b>1141</b>  | <b>12,4</b>           | <b>1153,2</b> | <b>44,6</b>           |
| <b>Promedio 08/02/2016</b>     |          |       | <b>&lt;L.D</b>        | <b>945,5</b> | <b>8</b>              | <b>953,5</b>  | <b>98,2</b>           |

<L.D: Menor al límite de detección

En las tablas 19 y 20 se pueden observar las concentraciones promedio de los gases de combustión evaluados en el generador de la prueba, durante las mediciones realizadas Biodiesel B8 y Fuel Oil Light No.4.

**Tabla 19.** Resumen promedio concentración de gases de combustión en el Generador PG-645 con Biodiesel B8 como combustible

|                 | SO <sub>2</sub> (ppm) | NO (ppm) | NO <sub>2</sub> (ppm) | NO <sub>x</sub> (ppm) | CO (ppm) |
|-----------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|----------|
| <b>Mínimo</b>   | 9                     | 1106     | 12                    | 36                    | 1119     |
| <b>Máximo</b>   | 11                    | 1169     | 13                    | 57                    | 1182     |
| <b>Promedio</b> | 10.4                  | 1141     | 12.4                  | 44.6                  | 1153.2   |

**Tabla 20.** Resumen promedio concentración de gases de combustión en el Generador PG-645 con Fuel Oil Light No.4 como combustible

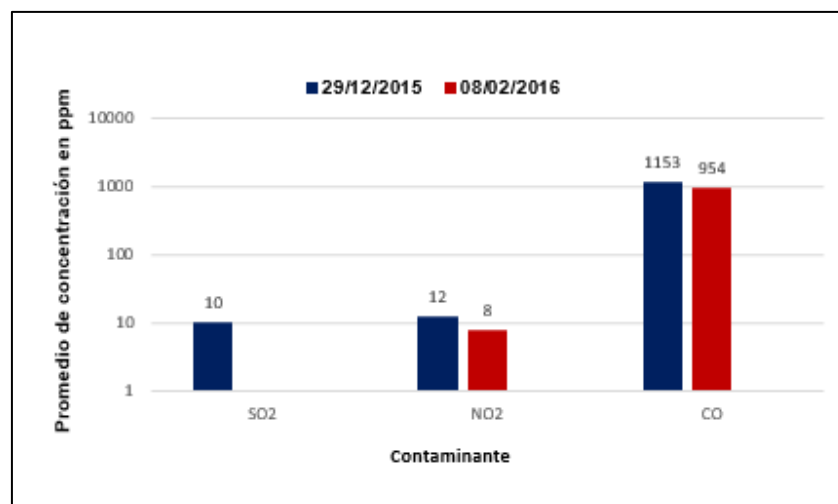
|          | SO <sub>2</sub> (ppm) | NO (ppm) | NO <sub>2</sub> (ppm) | NO <sub>x</sub> (ppm) | CO (ppm) |
|----------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Mínimo   | <L.D                  | 935      | 6.9                   | 87                    | 941      |
| Máximo   | <L.D                  | 953      | 9.4                   | 129                   | 962      |
| Promedio | <L.D                  | 945,5    | 8,01                  | 98,16                 | 953,5    |

<L.D: Menor al límite de detección

A partir de los resultados mostrados en las tablas 19 y 20, se puede hacer relevancia en la generación relativamente alta de óxidos de nitrógeno respecto a los demás contaminantes analizados en el motor, como también la alta generación de monóxido de carbono, los cuales se pueden tomar como un indicativo del desempeño del motor y a la eficiencia de la combustión que se lleva a cabo en esta clase de equipos.

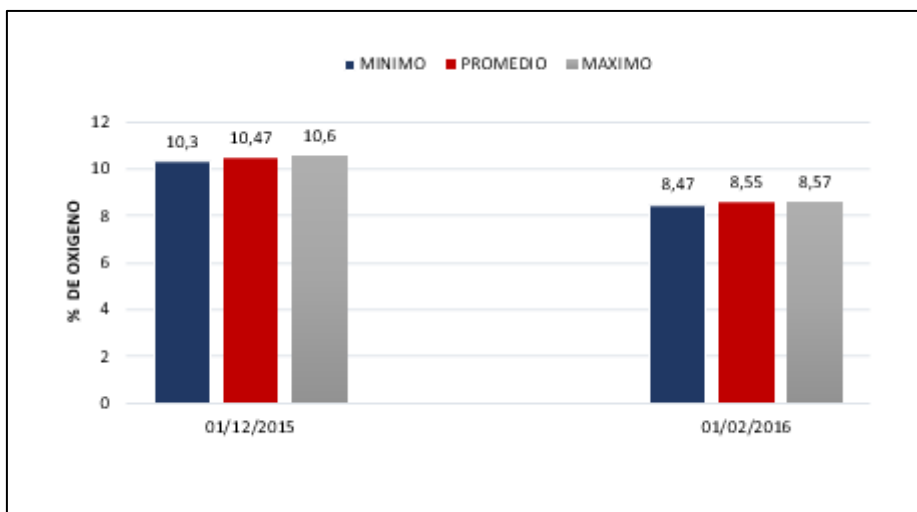
En la figura 36 se muestran los resultados obtenidos para los principales gases de combustión analizados en el Power Group PG-645 para cada uno de los días de medición, y el promedio global, como se puede observar el promedio del contenido de monóxido de carbono (CO) es el más alto con respecto a los demás 1153,2 y 953,5 ppm para cada uno de los combustibles analizados, el cual generalmente es producto de una combustión incompleta, en cuanto al dióxido de nitrógeno el promedio determinado fue de 44,6 ppm y 98,2 ppm mientras que para el dióxido de azufre fue de 10,4 ppm y por debajo del límite de detección para Fuel Oil Light No.4, para ambos días de medición.

**Figura 36.** Comparación promedio gases de combustión en el Generador PG-645



En la figura 37 se presenta la comparación de los resultados obtenidos respecto al porcentaje de oxígeno encontrado durante las dos mediciones al motor; en general se puede observar que la operación con biodiesel B8 y Fuel Oil Light No.4 en promedio para los días de medición es de 10,47% y 8,55% respectivamente, el rango para el primer día de medición se encuentra en 0,3% en tanto que para el segundo día fue de 0,01%

**Figura 37.** Comparación del porcentaje de oxígeno en el Generador PG-645.



### 3.6.14 Reporte de errores en la evaluación de las emisiones

El análisis de los datos se acoge a los procedimientos establecidos por la EPA y requeridos por la normatividad ambiental nacional vigente para cada uno de los contaminantes estudiados, por lo cual la incertidumbre de los resultados calculados está dentro de los límites aplicables a estos métodos.

### 3.6.15 Resultado de los datos

De las actividades de monitoreo de emisiones atmosféricas realizadas sobre el motor del generador PG-645 de la ubicación Cluster 1 en Campo en estudio, se tienen las siguientes conclusiones.

- Para el motor generador en operación con combustible Biodiesel B8, se encuentra que el oxígeno promedio medido registra un valor de 10,4%, mientras que para operación con Fuel Oil Light No.4 el porcentaje de oxígeno fue de 8,5%, reportando una diferencia de 1,9%
- Para el motor generador en operación con combustible Biodiesel B8, se encuentra un promedio de 1153,2 ppm de óxidos de nitrógeno en los gases de combustión, en tanto para el motor con Fuel Oil Light No.4 como combustible es de 953,5 ppm con una diferencia de 199,7 ppm.
- Se evidencia una concentración relativamente alta de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono en los gases de combustión, lo cual podría ser un indicativo del desempeño de la combustión en los motores.
- Mediante el análisis de opacidad de los gases de combustión, se encontró una generación alta y densa de hollín; esto podría indicar un bajo desempeño del proceso de combustión como resultado del combustible utilizado y/o las condiciones bajo las cuales opera el equipo.

## **4. EVALUACIÓN FINANCIERA**

Con la abrupta caída de los precios del petróleo las empresas han tomado como estrategia aplicar recortes en sus estructuras de costos, basándonos en los ítems que generan mayor gasto en la producción de los hidrocarburos, se determina al Combustible como uno de los mayores costos de producción, dado lo anterior se plantea, una sustitución de biodiesel por Fuel Oil Light No.4, analizaremos su estructura de costos:

### **4.1 PRECIO BIODIESEL**

Para el cálculo del precio de los combustibles el gobierno utiliza una fórmula para el respectivo cobro por galón. Las variables utilizadas son:

#### **4.1.1 Ingreso al productor**

Este porcentaje corresponde al productor que para el caso es Ecopetrol. En este se remunera la actividad de refinación o transformación del petróleo en sus derivados, el cual es vendido posteriormente a los distribuidores mayoristas que luego llegan a las estaciones de servicio para la comercialización a los usuarios finales. En este ingreso están los proyectos de exploración, ampliación e inversiones. Este ítem también trae incluido el costo del transporte a través de los diferentes oleoductos, desde el lugar de almacenamiento mayorista al minorista, hace un tiempo Ecopetrol realizaba el transporte.

#### **4.1.2 Impuesto territorial**

Este es el impuesto regional o territorial que se cobra al consumo de combustible, la sobretasa a la gasolina es un impuesto territorial. Existe una sobretasa a la gasolina y una sobretasa al ACPM. La Sobretasa a la Gasolina fue autorizada mediante la Ley 86 de 1989, el artículo 259 de la Ley 223 de 1995, la Ley 488 de 1998, y el artículo 55 de la Ley 788 de 2002.

“Los responsables de sobretasa son los distribuidores mayoristas de gasolina motor extra y corriente y del ACPM, los productores e importadores. Además, son responsables directos del impuesto los transportadores y expendedores al detal, cuando no puedan justificar debidamente la procedencia del combustible que transporten o expendan y los distribuidores minoristas en cuanto al pago de la sobretasa de la gasolina y el ACPM a los distribuidores mayoristas, productores o importadores, según el caso.”

#### **4.1.3 Impuesto nacional**

“El impuesto nacional a la gasolina y al ACPM fue creado con la reforma tributaria y reemplaza el antiguo impuesto global a la gasolina y al ACPM establecido en los artículos 58 y 59 de la Ley 223 de 1995, y el IVA a los combustibles, desde el 1º de enero de 2013.

Este impuesto será deducible del impuesto sobre la renta por ser mayor valor del costo del bien.

De igual forma, el contribuyente podrá llevar como IVA descontable el 35% del impuesto nacional a la gasolina y al ACPM pagado durante el periodo. Este impuesto es el que sustituye el antiguo impuesto global a los combustibles y el IVA a los combustibles, que rige a partir del 1 de enero de 2013.

#### **4.1.4 Biocombustibles**

Este rubro corresponde al de los biocombustibles utilizados en los combustibles. Para mejorar el índice de octanos y de cetanos (gasolina y diésel) con estos biocombustibles se puede entregar combustibles de más alta calidad. Para mejorar los estos índices se utilizan:

Alcohol carburante (Etanol) para mejorar el octanaje en la gasolina Biodiesel: es un biocombustible que sustituye al diésel con muchas ventajas, Se elabora a partir de cualquier aceite vegetal virgen o usado, o de grasas animales. Para La fabricación del biodiesel se parte de un aceite vegetal o grasa animal el cual se somete a un proceso de transesterificación. Como resultante de este proceso se obtiene biodiesel y un subproducto conocido como glicerol.

#### **4.1.5 Margen de distribución**

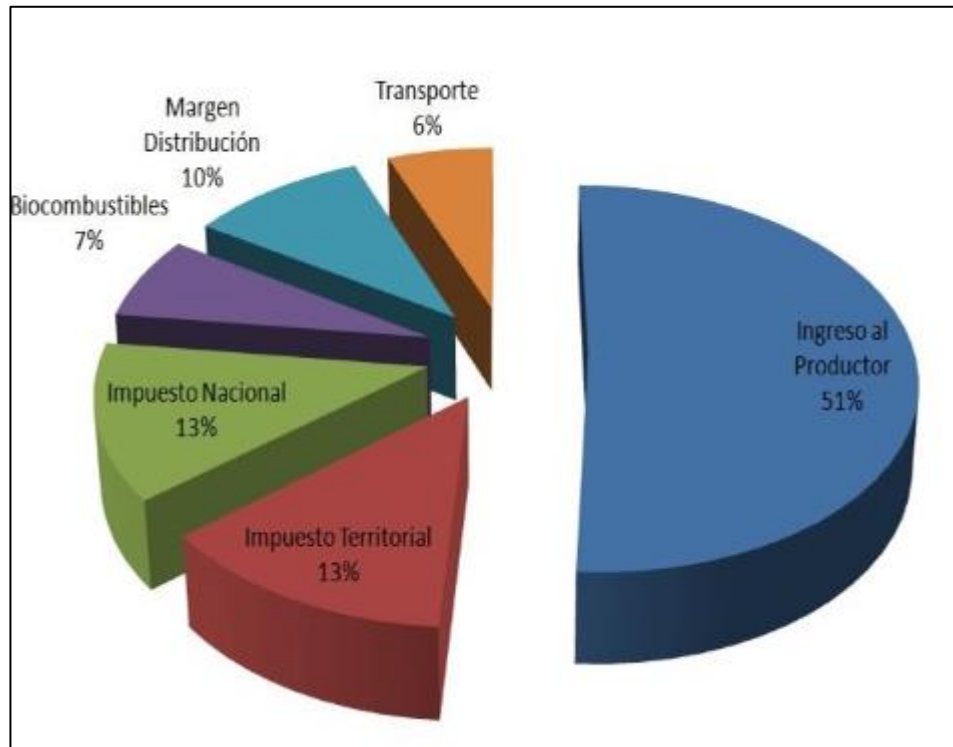
Remunera las inversiones requeridas para realizar todas las actividades de comercialización tanto a nivel mayorista como minorista. Este margen es regulado por el gobierno nacional. El Ministerio de Minas y Energía modificó el rubro Margen de Distribución Minorista (MDM) al definir el precio de referencia de la gasolina motor, delACPM y los biocombustibles, una cifra que no cambiaba desde el 28 de diciembre de 2011.

#### **4.1.6 Transporte**

Este ítem hace referencia al transporte desde los mayoristas hasta los minoristas, el transporte de los minoristas a las estaciones de servicio y de aquí a los surtidores. Este margen también incluye Costo de los fletes marítimos o

terrestres y demás costos incurridos para transportar un galón de gasolina desde el puerto de exportación local de la Costa Colombiana.

**Figura 38.** Distribución precio Biodiesel



Dados los indicadores anteriores el Distribuidor Mayorista despachara desde su Terminal de Combustibles de la Sabana Mancilla ubicada en el municipio de Facatativá del departamento de Cundinamarca, donde se recibe el producto por medio de un poliducto de Ecopetrol.

#### 4.2 PRECIO FUEL OIL LIGHT No.4

Para calcular el precio del Fuel Oil Light No.4 nos basamos en los siguientes indicadores:

#### 4.2.1 Heating Oil Nymex

Se determina usar como base para la monetización del producto Fuel Oil Light No.4, el indicador de mercado Heating Oil suministrado por la bolsa de New York Mercantile Exchange (NYMEX), el cual hace referencia a un combustible de calefacción, en Europa y Estados Unidos, adicionalmente funciona muy bien ya que este producto no es de uso para Automotor, y en esta bolsa, creada a mediados del siglo XIX, se contratan fundamentalmente derivados financieros (futuros y opciones) de metales preciosos (oro, plata, platino, paladio...) y productos energéticos como petróleo o gas natural. La operativa en este mercado se realiza básicamente a través de una plataforma electrónica, aunque un cada vez más reducido número de operaciones se realizan materialmente en su sala de operaciones, en Nueva York.

La publicación oficial para la toma de este indicador es la revista platts la cuales es una división de la multinacional McGraw-Hill. Esta división es la sociedad rectora (dirige y gestiona) del mercado financiero de futuros y opciones de productos derivados que son negociados (contratación y liquidación) en los mercados de origen de los productos energéticos de todo el mundo. Por ello es la única entidad que suministra información sobre futuros y opciones de los productos derivados energéticos en todo el mundo, exigiendo para ello una cláusula de confidencialidad de los datos suministrados y el pago de una suscripción anual.

Precio Fuel Oil Light No.4 = Heating Oil + Flete

A continuación se define cada uno de los términos anteriores:

Heating Oil: Corresponde al promedio semanal de la semana inmediatamente anterior a la semana efectiva de entrega, de las cotizaciones del Heating Oil (Nymex Heating Oil Futures Front Month) reportado por la publicación Platts.

### **4.3 ANALISIS DE VALOR PRESENTE NETO DIFERENCIAL**

Se desarrolló un análisis de precio diferencial entre las alternativas No.1 utilización de Biodiesel como fuente de generación versus la alternativa No. 2 considerando la utilización de Fuel Oil Light No.4 y basado en las siguientes premisas:

#### **4.3.1 Premisas**

- El tiempo de evaluación es de tres años.
- Se asume una Tasa de cambio del peso Colombiano (TRM) de \$ 3.100 COP.
- Se estima precios para el Heating Oil (Nymex), basados en la proyección de indicadores de mercado de la compañía.
- Se estimó un incremento mensual del 5% en precio del Biodiesel, ya que en los últimos meses se ha comportado de esa manera.
- Proyección estimada de la curva de producción: 49 KBOPD y 1.1 KBWPD.
- Se asume 10 MW promedio en generación localizada.
- Requerimiento de energía de 12,94 MW para levantamiento y manejo de fluidos de pozos representados en equipos de combustión.
- El volumen de combustibles para campamentos se estimaron, producción total por la constante 0,0015 considerando la eficiencia de los equipos de generación.

- El máximo porcentaje de Fuel Oil Light No.4 en cada campo será de 92% el 8%, el consumo diferencial se mantiene en Biodiesel para parque automotor (aplica para Generación de la Operación).
- Para la evaluación financiera se emplearon las siguientes premisas:

**Tabla 21.** Premisas financieras

| Descripción       | Valor   | Unidades           |
|-------------------|---------|--------------------|
| TRM               | 3100    | COP/USD            |
| Tasa de Descuento | 12%     | % efectivo Anual   |
| Tasa de Descuento | 0,9489% | % efectivo Mensual |

### 4.3.2 Análisis de Alternativas por medio de VPN

#### 4.3.2.1 Curvas de fluido

A continuación las curvas de producción de agua y crudo en barriles para 36 meses.

**Tabla 22.** Producción estimada Campo en estudio

|                                   | Mes 0     | Mes 1     | Mes 2     | Mes 3     | Mes 4     | Mes 5     | Mes 6     | Mes 7     | Mes 8     | Mes 9     | Mes 10    | Mes 11    | Mes 12    | Mes 13    | Mes 14    | Mes 15    | Mes 16    | Mes 17    | Mes 18    |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Curvas de Fluido en Bbls de Crudo | 56.363    | 54.063    | 51.858    | 50.035    | 51.759    | 48.560    | 46.848    | 45.233    | 43.652    | 42.135    | 40.863    | 39.490    | 37.333    | 36.742    | 36.184    | 35.432    | 34.654    | 33.769    | 33.264    |
| Curvas de Fluido en Bbls de Agua  | 1.224.120 | 1.225.540 | 1.225.610 | 1.227.520 | 1.222.872 | 1.215.702 | 1.208.409 | 1.333.382 | 1.340.519 | 1.337.475 | 1.337.338 | 1.337.670 | 1.337.722 | 1.337.394 | 1.344.314 | 1.342.220 | 1.399.255 | 1.408.122 | 1.409.932 |
| Curvas de Fluido Total            | 1.280.483 | 1.279.603 | 1.277.468 | 1.277.555 | 1.274.631 | 1.264.262 | 1.255.257 | 1.378.615 | 1.384.171 | 1.379.610 | 1.378.201 | 1.377.160 | 1.375.055 | 1.374.137 | 1.380.498 | 1.377.652 | 1.433.909 | 1.441.891 | 1.443.196 |
| Curvas de Consumo en Kw           | 10,6      | 9,7       | 10,6      | 15,6      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 11,9      | 10,0      | 10,0      | 10,0      | 10,1      | 10,3      | 10,2      | 10,1      |

|                                   | Mes 19    | Mes 20    | Mes 21    | Mes 22    | Mes 23    | Mes 24    | Mes 25    | Mes 26    | Mes 27    | Mes 28    | Mes 29    | Mes 30    | Mes 31    | Mes 32    | Mes 33    | Mes 34    | Mes 35    | Mes 36    |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Curvas de Fluido en Bbls de Crudo | 32.757    | 32.081    | 31.222    | 30.337    | 29.409    | 34.169    | 35.235    | 35.016    | 35.122    | 34.938    | 34.785    | 34.288    | 33.891    | 33.824    | 33.984    | 34.214    | 34.328    | 33.806    |
| Curvas de Fluido en Bbls de Agua  | 1.417.804 | 1.423.431 | 1.440.197 | 1.449.066 | 1.451.539 | 1.459.296 | 1.469.038 | 1.471.785 | 1.488.452 | 1.496.504 | 1.504.086 | 1.519.275 | 1.522.575 | 1.524.249 | 1.504.257 | 1.487.991 | 1.463.383 | 1.447.439 |
| Curvas de Fluido Total            | 1.450.561 | 1.455.512 | 1.471.419 | 1.479.403 | 1.480.948 | 1.493.465 | 1.504.274 | 1.506.802 | 1.523.575 | 1.531.442 | 1.538.871 | 1.553.563 | 1.556.465 | 1.558.073 | 1.538.241 | 1.522.205 | 1.497.711 | 1.481.245 |
| Curvas de Consumo en Kw           | 10,1      | 10,1      | 10,0      | 10,1      | 10,1      | 10,1      | 10,1      | 10,0      | 10,0      | 9,9       | 10,0      | 10,0      | 10,0      | 10,0      | 10,0      | 9,8       | 9,9       | 9,9       |

### 4.3.2.2 Descripción de Variables

A continuación los galones de biodiesel requeridos para la generación y su costo

**Tabla 23.** Costo del rubro de combustible para generación con Biodiesel.

|                                   | Mar 0         | Mar 1         | Mar 2         | Mar 3         | Mar 4         | Mar 5         | Mar 6         | Mar 7         | Mar 8         | Mar 9         | Mar 10        | Mar 11        | Mar 12        | Mar 13        | Mar 14        | Mar 15        | Mar 16        | Mar 17        | Mar 18        |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Galones de Biodiesel Requeridos   | 565.924       | 480.460       | 562.078       | 803.660       | 629.764       | 609.449       | 629.764       | 629.764       | 609.449       | 629.764       | 609.449       | 629.764       | 531.429       | 480.000       | 531.429       | 520.372       | 545.932       | 522.946       | 538.862       |
| Costo de Generación con Biodiesel | 4.267.271.442 | 3.318.787.665 | 4.041.944.369 | 5.648.220.892 | 4.473.428.624 | 4.545.580.698 | 4.931.955.057 | 5.178.552.810 | 5.262.077.856 | 5.709.354.473 | 5.801.440.836 | 6.294.563.307 | 5.577.272.896 | 5.289.413.649 | 6.148.943.367 | 6.322.061.387 | 6.964.227.127 | 7.004.554.523 | 7.578.627.170 |
| Costo biodiesel                   | 7.540         | 6.908         | 7.191         | 7.028         | 7.103         | 7.459         | 7.831         | 8.223         | 8.634         | 9.066         | 9.519         | 9.995         | 10.495        | 11.020        | 11.571        | 12.149        | 12.757        | 13.394        | 14.064        |
| Días                              | 31,0          | 29,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0          | 28,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          |

|                                   | Mar 19        | Mar 20        | Mar 21        | Mar 22        | Mar 23        | Mar 24         | Mar 25        | Mar 26         | Mar 27         | Mar 28         | Mar 29         | Mar 30         | Mar 31         | Mar 32         | Mar 33         | Mar 34         | Mar 35         | Mar 36         |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Galones de Biodiesel Requeridos   | 537.473       | 517.544       | 532.165       | 521.516       | 537.020       | 535.386        | 483.060       | 531.011        | 515.757        | 525.434        | 514.641        | 529.306        | 531.836        | 512.869        | 529.303        | 503.319        | 528.757        | 525.151        |
| Costo de Generación con Biodiesel | 7.937.036.699 | 8.024.887.964 | 8.664.175.322 | 8.915.342.030 | 9.639.395.418 | 10.090.564.080 | 9.559.573.629 | 11.033.933.410 | 11.252.825.329 | 12.037.151.328 | 12.379.386.159 | 13.368.761.161 | 14.104.303.057 | 14.281.349.252 | 15.475.914.763 | 15.452.019.676 | 17.044.599.767 | 17.774.795.167 |
| Costo biodiesel                   | 14.767        | 15.506        | 16.281        | 17.095        | 17.950        | 18.847         | 19.790        | 20.779         | 21.818         | 22.909         | 24.054         | 25.257         | 26.520         | 27.846         | 29.238         | 30.700         | 32.235         | 33.847         |
| Días                              | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0           | 28,0          | 31,0           | 30,0           | 31,0           | 30,0           | 31,0           | 31,0           | 30,0           | 31,0           | 30,0           | 31,0           | 31,0           |

**Tabla 24.** Costo del rubro de combustible para generación con Fuel Oil Light No.4

|   | Mar 19        | Mar 20        | Mar 21        | Mar 22        | Mar 23        | Mar 24        | Mar 25        | Mar 26        | Mar 27        | Mar 28        | Mar 29        | Mar 30        | Mar 31        | Mar 32        | Mar 33        | Mar 34        | Mar 35        | Mar 36        |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Galones de Fuel Oil Light No.4 Requeridos   | 510.599       | 491.667       | 505.557       | 495.441       | 510.169       | 508.617       | 458.907       | 504.460       | 489.969       | 499.162       | 488.909       | 502.841       | 505.244       | 487.225       | 502.838       | 478.153       | 502.319       | 498.894       |
| Costo de Generación con Fuel Oil Light No.4 | 3.010.882.770 | 2.899.246.469 | 2.981.151.806 | 2.921.497.843 | 3.008.247.892 | 2.999.192.956 | 2.706.064.763 | 2.974.683.218 | 2.889.233.509 | 2.943.442.029 | 2.882.979.656 | 2.965.134.055 | 2.979.308.669 | 2.873.054.142 | 2.965.115.398 | 2.819.559.245 | 2.962.057.472 | 2.941.859.847 |
| Costo Fuel Oil No.4                         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         |
| Días  | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0          | 28,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 30,0          | 31,0          | 31,0          |

|   | Mar 8         | Mar 1         | Mar 2         | Mar 3         | Mar 4         | Mar 5         | Mar 6         | Mar 7         | Mar 8         | Mar 9         | Mar 10        | Mar 11        | Mar 12        | Mar 13        | Mar 14        | Mar 15        | Mar 16        | Mar 17        | Mar 18        |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Galones de Fuel Oil Light No.4 Requeridos   | 537.628       | 456.437       | 533.974       | 763.477       | 598.276       | 578.977       | 598.276       | 598.276       | 578.977       | 598.276       | 578.977       | 598.276       | 504.857       | 456.000       | 504.857       | 494.353       | 518.636       | 496.799       | 511.919       |
| Costo de Generación con Fuel Oil Light No.4 | 2.212.921.144 | 1.950.062.807 | 2.578.445.070 | 3.843.067.091 | 3.229.459.167 | 3.198.866.260 | 3.473.218.424 | 3.503.886.617 | 3.501.386.320 | 3.547.245.097 | 3.538.996.646 | 3.780.693.496 | 2.977.024.759 | 2.688.925.589 | 2.977.024.759 | 2.915.085.941 | 3.058.273.220 | 2.929.507.245 | 3.018.667.644 |
| Costo Fuel Oil No.4                         | 4.116         | 4.272         | 4.829         | 5.034         | 5.398         | 5.525         | 5.805         | 5.857         | 6.048         | 5.929         | 6.113         | 6.319         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         | 5.897         |
| Días  | 31            | 29            | 31            | 30            | 31            | 30            | 31            | 31            | 30            | 31            | 30            | 31            | 31            | 28            | 31            | 30            | 31            | 30            | 31            |

Los resultados obtenidos de la comparación de las alternativas fueron: utilización de Biodiesel tendría un VPN del costo de COP\$ 260.689 millones a tres años frente a la utilización de Fuel Oil Light No.4 con un VPN del costo de COP\$ 94.832 millones, como se muestra a continuación:

**Tabla 25.**Resumen VPN

| Resumen de Analisis de Costo Diferencial de VPN |                   |
|---|-------------------|
| ALTERNATIVA No.1                                | \$260.689.549.214 |
| ALTERNATIVA No.2                                | \$94.832.139.731  |

Por consiguiente, se tendrían ahorros expresados en VPN al efectuar la utilización del Fuel Oil Light No.4 como fuente de generación (Alternativa No.2) son los siguientes:

**Tabla 26.** Ahorro VPN

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| AHORRO = | \$260.689.549.214 - \$94.832.139.731 |
| VPN=     | \$165.857.409.483                    |

Por otra parte se aclara que el beneficio obtenido del cambio al no requerir inversión adicional no se presenta recuperación de la mismo es decir no es posible la determinación de la Tasa Interna de Retorno TIR y tampoco se tiene un periodo de recuperación de la inversión ya que la sustitución presenta beneficio desde el periodo cero a partir de dicha sustitución.

Frente a un análisis de beneficio versus costo de efectuar la sustitución se presenta una reducción del 63,62 % de los costos al efectuar la misma.

**Tabla 27. Beneficio costo**

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| <b>Analisis de Costo / Beneficio</b> |                            |
| \$165.857.409.483                    | <b>Ahorro</b>              |
| \$260.689.549.214                    | <b>Costo con Biodiesel</b> |
| 63,62%                               |                            |

Ante el panorama actual de caída de los precios del petróleo que impactó sus ingresos y restringió su crecimiento, las compañías buscan alternativas de reducción de costos y uno de los factores que genera más gastos es el combustible.

Después de los resultados financieros observamos que la sustitución Fuel Oil light No.4 es viable y se obtiene un ahorros considerables.

## 5. CONCLUSIONES

El uso de Fuel Oil Light No.4 ha demostrado que técnicamente es viable en motores de bajas revoluciones (<1800 rpm) dadas las propiedades físicas del combustible (inclusión de cadenas pesadas en la destilación). Dado lo anterior se espera que con la implementación de este combustible los hurtos para comercialización ilegal desaparezcan ya que el parque automotor maneja motores a altas revoluciones.

Ambientalmente se evidencio que el uso del Fuel Oil Light No.4 cumple con los parámetros dentro de la misma magnitud a lo obtenido con el Biodiesel comercial, siendo una alternativa viable para la sustitución.

Desde el punto de vista económico es una excelente alternativa de ahorro y reducción de costos ante el panorama del mercado actual, ya que al efectuar la sustitución del biodiesel por el Fuel Oil Light No.4, se obtiene un ahorro estimado de \$165.857 Millones de pesos por un periodo de tres años.

De acuerdo a los resultados presentados en el estudio realizado al Fuel Oil Light No.4, se evidenciaron variables operacionales estables y sin exceder los parámetros de diseño del fabricante de los motores de los generadores.

Dados los buenos resultados en las pruebas realizadas en los equipos de bajas revoluciones recomendamos la sustitución del Biodiesel al Fuel Oil Light No.4 para equipos de generación, ya que el valor del NOx (Óxidos de Nitrógeno) para el Biodiesel estuvo en 1.399 ppm mientras el Fuel Oil Light No.4 estuvo en 1.346 ppm, lo cual nos da indicio de estar frente a emisiones similares generadas por

el Biodiesel para los parámetros realizados en las pruebas descritas en este documento.

## BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials (ASTM). D976 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels. ASTM. EEUUA. 2011.

American Society for Testing and Materials (ASTM). D975 Standard Specification for Diesel Fuel Oils. ASTM. EEUUA. 2012.

Calderón, Z. y Perez, M. Orientaciones prácticas para la elaboración exitosa de trabajos de grado en ingeniería. Primera edición. Colombia. División de Publicaciones. UIS. 2011.

Ciria, J. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel. Publicado por Wearcheck Ibérica. Documentación del área técnica. España 2009.

Congreso Nacional De La Republica. Ley 681 de 2001 Bogotá. El congreso; 2008.

Gui, M., Lee K. y Bhatia S. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. Energy. 2008.

Herrero, M., Juana, J., Santos, F., Macías, M. y Hernández, J. Energías Renovables para el desarrollo. Biocombustibles. Argentina. 1997.

Larosa, J. Proceso para la producción de biodiesel, metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos. Refinación de glicerina. Editado por Ediciones Técnicas. DF. 2004.

Ministerio del medio Ambiente. Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 898 del 23 de agosto de 1995. Bogotá: El ministerio; 1995.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 909 del 5 de junio de 2008, Bogotá: El ministerio; 2008.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1309 del 13 de julio de 2010, Bogotá: El ministerio; 2010.

Ministerio de Minas y Energía. Decreto 1073 del 26 de agosto de 1995. Bogotá: El ministerio; 1995.

Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 18 0782 del 30 de Mayo de 2007. Bogotá. El ministerio; 2007.

Salvatore R. Significance of tests for Petroleum products. Octava Edición. ASTM International. 2010.

Taplin, Harry; Combustion Efficiency tables, The Fairmont Press, Inc., 1991.

Pahl, G. Biodiesel Growing a New Economy. Editado por Chelsea Green Publish Company. EEUUA. 2005.