

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y DE EMISIONES DE UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN ALIMENTADO  
CON MEZCLAS DE DIESEL Y PROPANO SIN PRECALENTAR**

WENDY TATIANA AGUILAR CARO  
GILBERTO STEVEN TRIANA GARZÓN

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2019

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y DE EMISIONES DE UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN ALIMENTADO  
CON MEZCLAS DE DIESEL Y PROPANO SIN PRECALENTAR**

WENDY TATIANA AGUILAR CARO  
GILBERTO STEVEN TRIANA GARZÓN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director  
ALEXANDER GARCIA MARIACA  
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2019

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.2 Objetivo General.....	10
2.3 Objetivos específicos.....	10
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3.1 Definición del problema.....	11
3.2 Pregunta de investigación.....	11
3.3 Justificación.....	11
4. MARCO TEÓRICO.....	12
4.1 Motores de combustión interna.....	12
4.1.1 Motor de cuatro tiempos.....	12
4.1.2 Motor Diésel.....	13
4.2 Ciclos ideales.....	13
4.2.1 Ciclo Diésel.....	13
4.2.2 Ciclo Otto.....	14
4.3 Combustibles.....	15
4.3.1 Diésel.....	15
4.3.2 Gas licuado de petróleo.....	16
4.4 Estequiometría.....	16
4.5 Fracción molar.....	16
4.6 Fracción másica.....	16
4.7 Parámetros del desempeño de un motor.....	17
4.7.1 Potencia al freno.....	17
4.7.2 Consumo específico.....	17
4.7.3 Presión efectiva media al freno.....	17
4.7.4 Eficiencia térmica.....	17
4.7.5 Eficiencia volumétrica.....	18
4.8 Emisiones.....	18
5. ESTADO DEL ARTE.....	20
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1 Modificaciones.....	25
6.2 Procedimiento experimental.....	26
6.2.1 Pruebas.....	27

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
7.1 Consumo específico del combustible.....	30
7.2 Eficiencia Térmica .....	31
7.3 Eficiencia Volumétrica .....	32
7.4 Emisiones de Dióxido de Carbono.....	33
7.5 Emisiones de Monóxido de Carbono .....	34
7.6 Emisiones de hidrocarburos sin quemar .....	35
7.7 Costo de operación por hora del motor.....	36
8. CONCLUSIONES .....	37
RECOMENDACIONES .....	38
REFERENCIAS .....	39
ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Poder calorífico del Diésel y GLP .....	17
Tabla 2. Valores de las resistencias y potencia que se genera en el banco de resistencias	23
Tabla 3. Partes del montaje experimental .....	24
Tabla 4. Medición de combustible .....	27
Tabla 5. Medición Electrónica .....	28
Tabla 6. Medición de gases .....	28
Tabla 7. Flujo de GLP para las tres diferentes pruebas.....	29
Tabla 8. Resultados del consumo específico de combustible el freno para cada prueba ....	30
Tabla 9. Resultados de la eficiencia térmica para cada prueba.....	31
Tabla 10. Resultados de la eficiencia volumétrica para cada prueba .....	32
Tabla 11. Humedad relativa y temperatura ambiente .....	32
Tabla 12. Resultados de las emisiones de dióxido de carbono para cada dato.....	33
Tabla 13. Resultados de las emisiones de monóxido de carbono para cada prueba.....	34
Tabla 14. Resultados de las emisiones de hidrocarburos sin quemar para cada prueba ....	35
Tabla 15. Precio del Diésel y GLP en Colombia .....	36
Tabla 16. Resultados del costo por hora según precios del combustible en Bogotá .....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo operativo de un motor de cuatro tiempos .....	13
Figura 2. Ciclo Diésel .....	13
Figura 3. Ciclo Otto P-V .....	14
Figura 4. Porcentaje de los componentes de los gases de escape .....	18
Figura 5. Diagrama esquemático sistema Dual Diésel-GLP propuesto .....	23
Figura 6. Banco de pruebas vista frontal .....	24
Figura 7. Posición de las termocuplas.....	25
Figura 8. Prisioneros en el acople universal.....	25
Figura 9. Válvula de caudal y tanque almacenamiento del Diésel .....	25
Figura 10. Mallas de seguridad y base del cilindro de GLP .....	26
Figura 11. Banco de pruebas vista superior .....	26
Figura 12. Consumo específico de combustible .....	30
Figura 13. Eficiencia térmica .....	31
Figura 14. Eficiencia volumétrica.....	32
Figura 15. Emisión de Dióxido de carbono respecto al freno.....	33
Figura 16. Emisión de Monóxido de carbono respecto al freno .....	34
Figura 17. Emisión de Hidrocarburos sin quemar respecto al freno .....	35
Figura 18. Costo por hora del combustible.....	36

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL .....	42
ANEXO 2: CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL .....	43
ANEXO 3. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 1 .....	48
ANEXO 4. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 2 .....	53
ANEXO 5. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 3 .....	58

## RESUMEN

El siguiente trabajo de grado da a conocer los resultados obtenidos durante la realización de pruebas con un motor de combustión interna de encendido por compresión, utilizando Diésel y mezclas de GLP sin precalentar. Este proyecto tiene como fin el estudio del desempeño energético, las emisiones reguladas al freno y la variación en el consumo de Diésel para un motor de encendido por compresión, procurando que la implementación de esta mezcla no afecte el funcionamiento, es decir, la entrega del torque y potencia generada por el motor al funcionar con las especificaciones de diseño. Las pruebas realizadas con estas mezclas anteriormente mencionadas se obtuvieron resultados en la eficiencia térmica de un 10% adicional al obtenido con las pruebas Diésel el cual es de un 5%. Corroborando que esta mezcla es efectiva en los motores de encendido por compresión y aporta una solución de combustible para la generación de energía eléctrica.



## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2018 la demanda de energía en el mundo aumentó 2,9 %, según la compañía BP (British Petroleum) en Londres es un incremento de 13.800 millones de toneladas de crudo, en la edición LXVIII de la revisión de energía realizada por la BP este valor es el más alto registrado desde el 2010 [1], del mismo modo, el consumo de energía a nivel mundial se debe al transporte de comunidades y productos con destino a zonas de alta demanda. “Actualmente, cerca de un 60 % del petróleo que se produce en el mundo se utiliza para producir el combustible de los sistemas de transporte” [2].

Por otra parte, Colombia en la producción de petróleo y gas aumentó 8,6 % en lo corrido de este año [2], los informes realizados por el Ministerio de Minas y Energía dicen que se debe a la demanda de pueblos ubicados en los departamentos de Sucre, Casanare, Córdoba, Norte de Santander y Cesar, en los cuales se extrae y produce el combustible [2]. De acuerdo al artículo de economía realizado el 27 de septiembre 2019 por el periódico el nuevo siglo, los mayores desafíos que tiene Colombia son el acceso a la energía, la sostenibilidad ambiental, la seguridad y el desarrollo para el crecimiento económico [3], por ende, se da como solución al uso del gas licuado de petróleo (GLP).

El GLP es un combustible derivado de la mezcla de los hidrocarburos propano y butano, el primero se presenta en gran cantidad y el segundo puede estar en bajos porcentajes, estos son obtenidos de yacimientos de gas natural o de la destilación del petróleo. El objetivo de este proyecto es comprobar si la mezcla de Diésel-GLP sin precalentar y sin modificaciones sustanciales en el motor de combustión interna de encendido por compresión pueda operar de manera adecuada, además se estudiará en caso de operar adecuadamente el motor, el comportamiento de las emisiones tales como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos sin quemar (HC). Por otro lado, se estudiarán los beneficios económicos debido a la diferencia en los precios de combustible, sobre todo, evaluar el consumo de combustible Diésel con caudales volumétricos diferentes de GLP.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.2 Objetivo General**

- Evaluar el desempeño energético y de emisiones reguladas al freno de un motor de combustión interna de encendido por compresión operando con mezclas de diésel y GLP sin precalentar.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Obtener y analizar los parámetros de desempeño de un motor de encendido por compresión operando con mezclas de diésel y GLP sin precalentamiento.
- Obtener y analizar los parámetros de emisiones al freno de un motor de encendido por compresión operando con mezclas de diésel y GLP sin precalentamiento.
- Realizar la evaluación económica del uso de GLP como comburente en motores de encendido por compresión para la generación eléctrica.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 Definición del problema**

Los motores de combustión interna hacen parte de los generadores de energía más usados en la actualidad [5], su función principal es cambiar la energía química producida por el combustible a energía mecánica [4], debido a su gran versatilidad tienen diversas aplicaciones tales como transporte terrestre y marítimo, plantas generadoras de energía y zonas no interconectadas, es decir, lugares en donde la posibilidad de tener energía es mínima [5].

De acuerdo al Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) en Colombia hay 1.710 zonas rurales, de las cuales solo 128.587 personas tienen acceso al servicio de energía por lapsos de tiempo que oscilan entre cuatro y doce horas diarias [6], por este motivo la generación de electricidad por medio de un motor de combustión interna es una solución a la carencia de energía, para esto se implementará uno de los motores más utilizados en la industria como lo es el de encendido por compresión.

Una de las desventajas de los motores de encendido por compresión son las emisiones que genera al operar [5], por este motivo se desea realizar una mezcla de Diésel-GLP con el fin de estudiar los efectos que puede causar la combustión de estos dos combustibles en las emisiones y por ende saber si existe una reducción del consumo por la adición del GLP.

#### **3.2 Pregunta de investigación**

¿Qué variables de desempeño y emisiones se ven afectadas, al operar un motor con una mezcla de Diésel y Gas Licuado de Petróleo sin precalentar?

#### **3.3 Justificación**

La elaboración del presente trabajo de grado permite realizar proyectos investigativos dentro de la universidad teniendo como objetivo el aprendizaje de nuevos temas. Por otra parte, es importante ampliar los conocimientos sobre los motores dual Diésel-GLP como aporte a una solución energética a nivel nacional.

Con la implementación del Diésel-GLP como combustible en un motor de combustión interna se espera una disminución considerable en las partículas expulsadas en los gases de escape, fomentando el cuidado del medio ambiente, además, de beneficiar los sectores que carecen del servicio eléctrico. La intención del proyecto es aportar para el crecimiento del país en pro del mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos e impulsar la investigación, por ende, la competitividad de Colombia a nivel mundial.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son máquinas que tienen como propósito usar la energía química contenida en el combustible para producir energía mecánica. Para esto, la energía se libera oxidando o quemando el combustible [7].

Generalmente se conocen 3 tipos de motores de combustión interna como son el de dos y cuatro tiempos, además se considera motor a la turbina de gas. Por otra parte, en los motores de dos y cuatro tiempos se encuentran los encendidos por chispa para Gasolina y por compresión para Diésel.

#### 4.1.1 Motor de cuatro tiempos

Los cuatro tiempos en el motor significan las cuatro fases que debe realizar para completar un ciclo de trabajo, las cuales requieren de cuatro carreras del pistón o dos revoluciones del cigüeñal.

- Carrera de admisión: El pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS), la válvula de admisión se abre para permitir la entrada de aire mientras que la válvula de escape se encuentra totalmente cerrada y el pistón desciende a punto muerto inferior (PMI).
- Carrera de compresión: Al llegar el pistón al PMI se cierra la válvula de admisión y se comienza la carrera al PMS completando una revolución del cigüeñal donde se inyecta el combustible por medio de un inyector al cilindro.
- Carrera de combustión: Estando el pistón en PMS por la compresión del aire se genera un aumento del calor y como consecuencia al tener un porcentaje de Diésel, se genera una combustión uniforme que ejerce una fuerza sobre el cabezal del pistón que lo lleva a al PMI [8].
- Carrera de escape: Los gases generados por la explosión del combustible salen por la parte superior del cilindro cuando el pistón se dirige del PMI al PMS, la válvula de salida se abre para sí dejar que los gases generados salgan y así terminar los dos ciclos del cigüeñal.

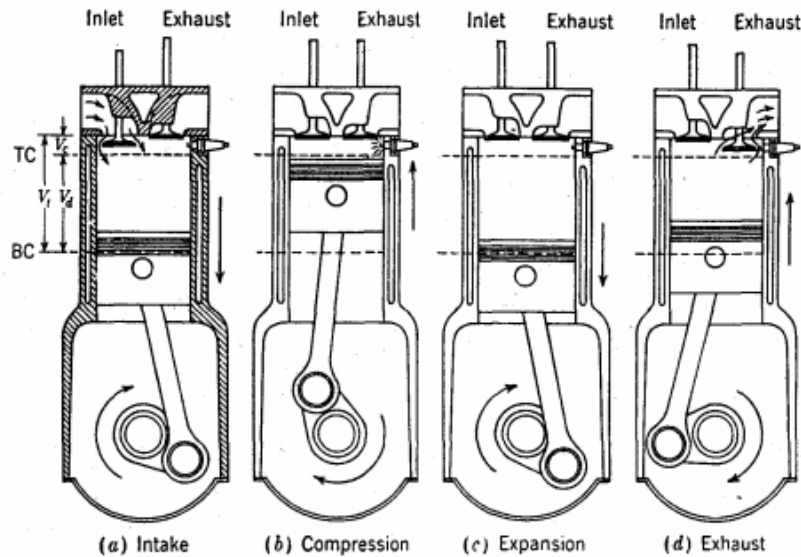


Figura 1. El ciclo operativo de un motor de cuatro tiempos

Fuente: [7]

#### 4.1.2 Motor Diésel

El motor Diésel o motor de encendido por compresión es un motor que enciende el combustible mediante el calor generado por la compresión careciendo de un sistema externo. Este motor aspira solamente aire para llenar los cilindros y no necesita carburador [8], el combustible ingresa a los cilindros por medio de inyectores que lanzan un chorro pulverizado a una alta presión con ayuda de una bomba de inyección.

#### 4.2 Ciclos ideales

##### 4.2.1 Ciclo Diésel

Es un modelo que simplifica lo que ocurre en un motor Diésel mediante un ciclo ideal, compuesto de la siguiente manera:

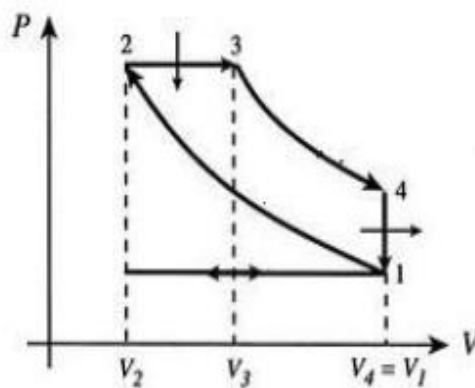


Figura 2. Ciclo Diésel

Fuente: [9]

- Admisión (isobárica 0-1): Es modelado como una expansión a presión constante debido a que la válvula de admisión está abierta y la presión es igual tanto dentro como fuera del cilindro [9].
- Compresión (adiabática 1-2): Es modelado como la curva adiabática reversible debido a que en compresión el aire no intercambia calor con el ambiente [9].
- Combustión (isobárica 2-3): Se diferencia del ciclo Otto, se modela como una adición de calor a presión constante ya que este proceso se encuentra entre el punto más alto al que llega el pistón y antes de que empiece a bajar [9].
- Expansión (adiabática 3-4): Por ser un proceso rápido se modela como una curva adiabática reversible, en consecuencia, por el empuje que hace el gas hacia abajo [9].
- Escape (isocórica 4-1): Es modelado por el enfriamiento del ciclo, dado que la cantidad de aire que sale es la misma que la que entra y la temperatura sale siendo mayor a la inicial [9].
- Escape (isobárico 1-0): Cuando la válvula está abierta el pistón empuja el aire hacia fuera cerrando el ciclo [9].

#### 4.2.2 Ciclo Otto

Siendo un ciclo idealizado que se aproxima teóricamente al comportamiento de un motor de combustión interna. Las Fases operación del motor idealmente son:

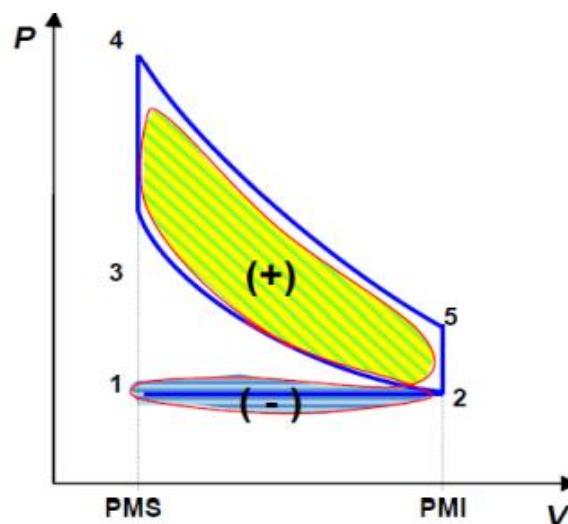


Figura 3. Ciclo Otto P-V

Fuente: [10]

- Admisión (isobárica): El aire ingresa al cilindro desde la atmósfera sin rozamiento, generando que no haya pérdida de carga y, por este motivo, la

presión en el interior del cilindro durante el proceso se mantenga igual a la atmosférica [11].

- Compresión (adiabática): como esta fase se realiza rápidamente, el fluido no intercambia calor con el sistema, por lo que se considera que el calor permanece constante [11].
- Combustión (isobárica): Al producirse la combustión dentro del cilindro, la cantidad de calor que se produce es  $Q_1$  [12], siendo ideal podemos afirmar que el cilindro no se mueve, por lo que el volumen durante este proceso será constante.
- Trabajo (adiabática): los gases generados por la explosión no intercambian calor con el medio generando que se considere que sufren una transformación a calor constante [11].
- Primera fase del escape (isocórica): suponiendo la apertura instantánea de la válvula de escape, se genera una salida súbita de los gases que están dentro del cilindro y una pérdida de calor  $Q_2$  que permite considerar un volumen constante [11].
- Segunda fase de escape (isobárica): El pistón al desplazarse al PMS expulsa los gases remanentes del cilindro, los gases al no generar resistencia para salir permiten que la presión dentro del cilindro sea la misma a la atmosférica [11].

### **4.3 Combustibles**

Los combustibles están dados por la reacción química de una sustancia para crear fuego, son usados para la producción de energía en motores, fuentes energéticas de aviones, cohetes, entre otros. Existen combustibles volátiles líquidos como la gasolina, aceitosos como el diésel o gaseosos como el gas licuado de petróleo y el gas natural. Estos últimos están compuestos por hidrocarburos y son de uso tanto doméstico como industrial. [12]

#### **4.3.1 Diésel**

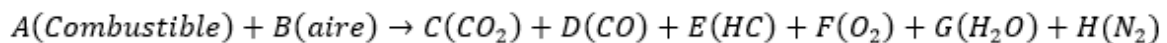
También conocido como gasoil es un aceite pesado elaborado a base de petróleo e hidrocarburos, a diferencia de la gasolina el Diésel se mezcla con aditivos para ayudar a mejorar las prestaciones y cualidades del motor, ya que entre más calidad tenga el Diésel la potencia y cuidado de los elementos será proporcional [13].

### 4.3.2 Gas licuado de petróleo

Conocido por sus siglas GLP, proveniente de la mezcla de dos hidrocarburos como son el propano y el butano, estos se extraen de los pozos de refinación del crudo. Los gases que lo componen se separan durante el proceso libres de azufre, plomo y con poco contenido de carbono, por ende, es un combustible limpio y amigable con el entorno. [14]

### 4.4 Estequiometria

Es la ciencia que determina las relaciones cuantitativas entre reactantes y productos de una reacción química, se aplica la ley de la conservación de la masa en donde, todo lo que entra es igual a lo que sale. [15]



Ecuación 1: Ecuación estequiométrica

### 4.5 Fracción molar

Es el número de moles de un elemento dividido en la sumatoria de los moles que tienen los productos de la reacción química. [16]

$$Y_m = \left( \frac{\text{mol}}{\sum \text{moles}} \right)$$

Ecuación 2: Fracción molar

### 4.6 Fracción másica

Es el porcentaje másico definido como el cociente entre la fracción molar por la masa molecular de cada componente y la fracción másica total por su respectiva masa molecular. [16]

$$X_m = \frac{m_{\text{molecular}} Y_m}{Y_{\text{molecular}} \sum Y_m}$$

Ecuación 3: Fracción másica



## 4.7 Parámetros del desempeño de un motor

### 4.7.1 Potencia al freno

Es la capacidad del motor para producir trabajo en el eje de salida o en las ruedas conductoras.

$$BP = T\omega$$

Ecuación 4: Potencia al freno

### 4.7.2 Consumo específico

Es la cantidad de combustible que consume el motor a lo largo de una hora para producir potencia al freno.

$$BS = \frac{\dot{m}}{BP}$$

Ecuación 5: Consumo específico

### 4.7.3 Presión efectiva media al freno

Es la presión promedio que se ejerce sobre el pistón para producir la potencia al freno en un motor, que también se puede medir con un dinamómetro de motor [17].

$$BMEP = \frac{4\pi T}{Vd}$$

Ecuación 6: Presión media efectiva al freno

### 4.7.4 Eficiencia térmica

Es la relación entre la potencia al freno suministrada por la mezcla en la entrada a la cámara de combustión y el flujo másico del combustible por el poder calorífico del mismo. [18]

Tabla 1. Poder calorífico del Diésel y GLP

LHV (kJ/kg)	
Diésel	44000
GLP	50180

$$\eta_{Térmica} = \frac{BP}{\dot{m}_{combustible} LHV}$$

Ecuación 7: Eficiencia térmica

### 4.7.5 Eficiencia volumétrica

Es la capacidad que tiene un motor para aspirar, este está dado por el volumen de aire que entra al cilindro en carrera de admisión.

$$\eta_{Volumétrica} = \frac{m_{aire}}{\rho_{aire} Vd}$$

Ecuación 8: Eficiencia volumétrica

### 4.8 Emisiones

Cuando hablamos de la composición de los gases de escape de los vehículos se utilizan los mismos componentes: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO. Cada una de estas sustancias representan una parte del total de los gases de escape. andes de describir cada una de las sustancias podemos evidenciar el porcentaje que ocupan cada una en los gases de escape en el motor Diésel.

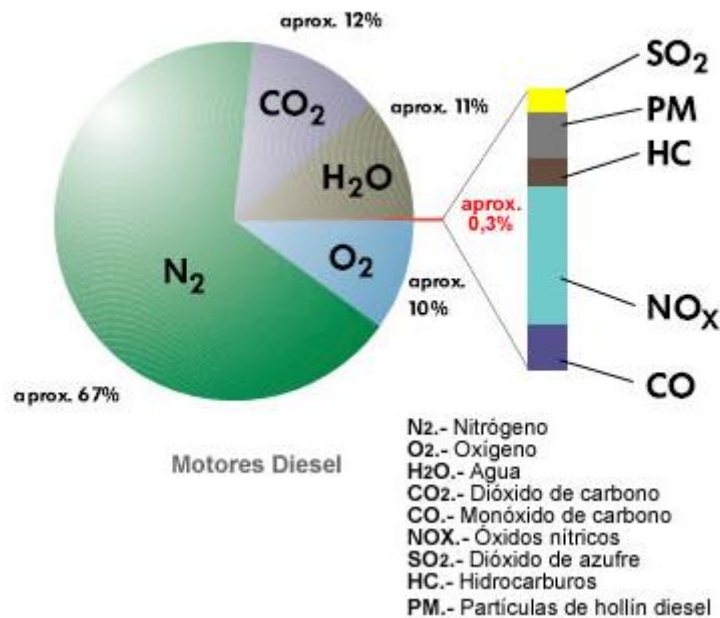


Figura 4. Porcentaje de los componentes de los gases de escape

Fuente: [19]

El Nitrógeno siendo un gas inerte se encuentra como componente del aire que respiramos con una concentración del 78% (21% oxígeno y 1% otros gases). Al ingresar al motor y producirse el proceso de combustión, este se oxida con ayuda del oxígeno formando un porcentaje menor del 0.3% de Óxidos de Nitrógeno [19] [20].

El Oxígeno es uno de los componentes más importantes para la combustión dentro del cilindro y se encuentra en el aire. Este define que la mezcla sea rica o pobre, si es pobre no podrá oxidar en su totalidad los Hidrocarburos y saldrá con el resto de componentes [19] [20].

El agua es aspirada en parte por la humedad del aire o se forma por la combustión, siendo un subproducto expulsado por el motor [20].

El Dióxido de carbono producido por la combustión de los combustibles los cuales tiene carbono, a pesar de ser un gas no tóxico reduce la capa de ozono que no permite el paso de los rayos UV y el calentamiento global [19] [20].

El Monóxido de carbono se produce en gran cantidad por la mezcla pobre o combustión incompleta dentro del cilindro. Siendo un gas altamente tóxico, con una exposición prolongada a él provoca la transformación de la hemoglobina, molécula encargada del transporte del oxígeno desde los pulmones a las células en carboxihemoglobina, siendo incapaz de realizar este procedimiento [19] [20].

Los Hidrocarburos son la composición de varios elementos nocivos para la salud, por ejemplo, el benceno es venenoso por sí solo y la exposición a este gas provoca irritación. Surgen de una combustión incompleta debido a la falta de oxígeno o una baja velocidad de inflamación, por lo que es conveniente ajustar la riqueza de la mezcla aire-combustible [19] [20].

## 5. ESTADO DEL ARTE

El GLP es un combustible natural de hidrocarburos que consta de propano y butano en cualquier porcentaje. Cuando se le aplica una presión se licua, permitiendo el almacenamiento de una gran cantidad respecto a un volumen pequeño. Muchos automóviles en el mundo utilizan este gas, ya que tiene bajo costo, es amigable con el medio ambiente, genera un mejor rendimiento y además es seguro de usar [21].

Por ejemplo, para un automóvil con 8 litros y un recorrido entre 100 y 20000 km produce 3860 kg de CO<sub>2</sub>, 16 kg de CO y 2.58 kg de HC, mientras que un automóvil que tenga la mezcla con GLP solo produce 2640 kg de CO<sub>2</sub>, 11.21 KG de CO y 1.87 kg de HC, lo cual conlleva una reducción del 28% de las emisiones. Al tener una mejor tasa de combustión que el diésel, ayuda a extender la vida útil del motor, además es un gas no corrosivo y sin aditivos con una clasificación de octanaje (102-108) [21].

El sistema Diseñado por la empresa Solaris no disminuye el consumo del Diésel a 0%, Actualmente su mezcla máxima es de un 80% Diésel y 20% GLP lo que reduce un ahorro de dinero del 17% respecto a un automóvil Diésel convencional. El GLP es añadido antes del turbocompresor reduciendo la temperatura del aire favoreciendo la mezcla aire-gas que posteriormente hace combustión con el Diésel, utilizándose como un carburante adicional en vez de combustible sustituto [22].

En un estudio del gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores se muestra cómo combinar el Diésel con el GLP teniendo como finalidad la reducción de las emisiones de gases contaminantes. Crearon un sistema de inyección para el gas, controlado a distancia por medio de un computador que inyectaba de acuerdo al requerimiento del motor; se concluyó que cuando aumentan las revoluciones por minuto del motor, disminuye el CO y NOX aumenta [23]

En otra instancia, el uso de gas licuado de petróleo presenta más ventajas que desventajas, sin embargo, su falencia más notoria es la forma como se almacena, debido a que se hace en tanques de presión y más tarde es distribuido. La seguridad es un factor importante y el transporte del GLP puede atentar contra la misma, por ejemplo, se han presentado varios accidentes en donde el GLP explota, sin embargo, se han minimizado con las reglas que se han estipulado [24]

Otro aspecto interesante es la gran expectativa que se tiene en la implementación del GLP como un combustible de carácter alternativo dentro de la industria automotriz e incluso de transición hacia otras fuentes de energía más amigables con el medio ambiente, en el trabajo de maestría de Mauricio Chaparro se propone el diseño y las normativas para la conversión de vehículos automotores colombianos con gasolina hacia el GLP, en muchos libros y otros tipos de literatura se debate el rendimiento y eficiencia del motor con GLP mediante experimentos, modelos y simulaciones [25].

Finalmente, el siguiente trabajo combina dos combustibles como el Diésel y el gas licuado de petróleo desarrollado bajo la óptica de garantizar una combinación de combustibles que pueda reducir los gases contaminantes generados por el Diésel y observar su comportamiento en cuanto a eficiencia, par entregado y potencia. Se evalúan los parámetros de desempeño de un motor de combustión interna acoplado a un sistema de sustitución de GLP y Diésel como combustible piloto [26].

## 6. METODOLOGÍA

Las pruebas experimentales se desarrollaron en un banco de pruebas que cuenta con los siguientes elementos:

- Un motor de combustión interna mono-cilíndrico de inyección directa de 50x46x56 cm y una relación de compresión de 19:1, su potencia máxima es 10 hp, el eje es de cuña-rosca y tiene una cilindrada de 418 cc. Además, el cilindro tiene un diámetro de 86 mm y la carrera es de 72 mm.
- Un sensor de torque de línea básica tipo 4520A\_002-515e-01.14 con una sección torsional en el eje y galgas extenso métricas con un transformador A/D, puede ser alimentado entre 18 y 26 VDC y su consumo de energía es menor a 2 W, la salida del torque es de  $\pm 10$  VCC.
- Un codificador de eje óptico modelo 725 con un rendimiento de resoluciones de hasta 30.000 ciclos por revolución, una carcasa estándar con una unidad de codificación interna aislada. Por otra parte, el voltaje de entrada va desde 4.75 a 28 VDC para temperaturas por encima de 70 °C y de 4.75 a 24 VDC para temperaturas entre 70 °C y 100 °C, su frecuencia máxima es de 1 MHz y la corriente de entrada máxima es de 100 mA sin carga.
- Medidor de masa de aire o MAF de película caliente tipo HFM 5, toma mediciones de aire hasta 1200 kg/h, su alimentación de voltaje es de 14 V, maneja rangos de temperaturas entre -40 °C a 120 °C y su caída de presión respecto al rango de medida es  $< 15$  hPa, por ultimo su aceleración de vibración permitida es  $\leq 150$  m/s<sup>2</sup>.
- Un alternador trifásico GSA-H2-2 B3 de 3600 revoluciones por minuto y una potencia nominal de 9 KVA, su frecuencia es de 60 Hz, el voltaje se encuentra entre 127 V y 220 V, además tiene un amperaje de 26 A.
- Un analizador de gases GGA8T000561 marca TEXA con una fuente de alimentación de 19 V y 2.2 A, maneja temperaturas de  $5 \div 40$  °C y una presión de  $85 \div 102.5$  kPa, además mide flujos hasta de 4.3 l/min. El analizador mide emisiones tales como CO en %, CO<sub>2</sub> en %, HC en ppm, O<sub>2</sub> en %, RPM en 1/min y la temperatura del motor en °C.
- Un banco de resistencias que cuenta con 14 resistencias, siendo la n°9 la que abre el circuito de las resistencias ubicadas en horizontal, en la siguiente tabla se registran los datos de resistencia y potencia para cada una:

Tabla 2. Valores de las resistencias y potencia que se genera en el banco de resistencias

N°	Resistencia ( $\Omega$ )	Potencia (kW)	Potencia (W)
1	38,8	1,25	
2	26,2	1,85	
3	38,5	1,25	
4	38,8	1,25	
5	38,9	1,25	
6	503		100
7	253		200
8	98,8		500
9	2300		Abre el circuito
10	120,5		400
11	983		50
12	2470		20
13	2247		20
14	4480		10

La Figura 5 es un diagrama esquemático de la ubicación y conformación del banco de pruebas; en la Tabla 3 se encuentran las componentes del banco y su respectivo número de ubicación en el diagrama.

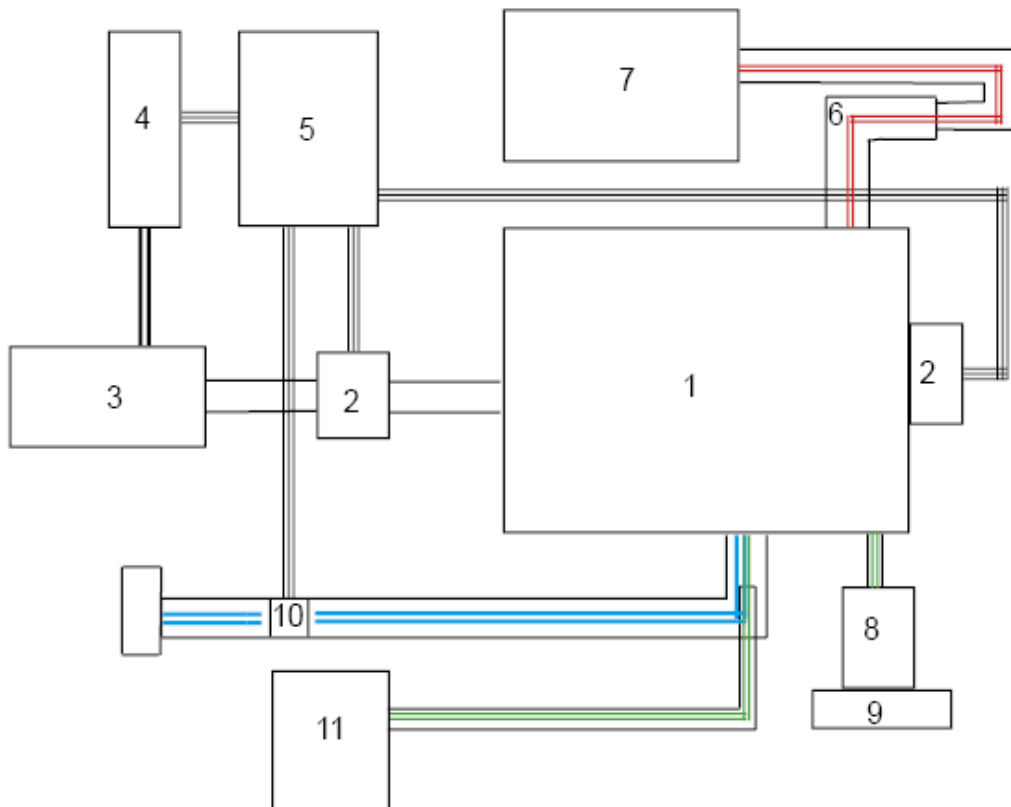






Figura 5. Diagrama esquemático sistema Dual Diésel-GLP propuesto

Tabla 3. Partes del montaje experimental

COMPONENTES DEL BANCO		
DESIGNACION	EQUIPO	REFERENCIA
1	Motor Diésel	MD418E-G
2	Sensor de Par codificador	Modelo 725
2	Sensor de Par	4520A_002-515e-01.14
3	Generador eléctrico	GSA-H2-2 B3
4	Banco de resistencias	--
5	Sistema de control electrónico	--
6	Tubo de escape	--
7	Analizador de gases	GGA8T000561
8	Tanque de Diésel	--
9	Gramera digital	Scout Pro SP2001
10	Sensor MAF	HFM 5
11	Tanque de GLP	20 Lb
	Conexiones eléctricas	--
	Flujo de aire	--
	Flujo de combustible	--
	Flujo de emisiones	--

El banco de pruebas se encuentra ubicado en el laboratorio de mecánica automotriz de la sede Bolívar en la Fundación Universitaria Los Libertadores, debido a que cuenta con un sistema de extracción y un espacio adecuado para la operación del mismo.



Figura 6. Banco de pruebas vista frontal



## 6.1 Modificaciones

Antes de comenzar las pruebas experimentales se realizaron modificaciones tales como ensamblar una válvula de caudal en la entrada del Diésel al motor con el objetivo de tener mayor control del paso de combustible, como se muestra en la figura 8. Por otra parte, para medir la temperatura en el aceite, el tubo de escape y el tubo de admisión de aire, se introdujeron 3 termocuplas.



Figura 7. Posición de las termocuplas

Durante las primeras pruebas mientras se evaluaba el correcto funcionamiento del banco de pruebas, el acople universal presentó fallas en la rosca del prisionero que sujeta la cuña, aumentando el juego de la pieza y, por ende, afectando las mediciones del sensor de par, en consecuencia, se modificó el diámetro de la rosca con ayuda de un macho y se ajustó con un prisionero.



Figura 8. Prisioneros en el acople universal

Se realiza la instalación del tanque independiente del combustible para la toma del consumo del mismo con respecto al tiempo, dado que el tanque anterior ubicado a un costado del motor dificultaba la toma de datos con la gramera digital.

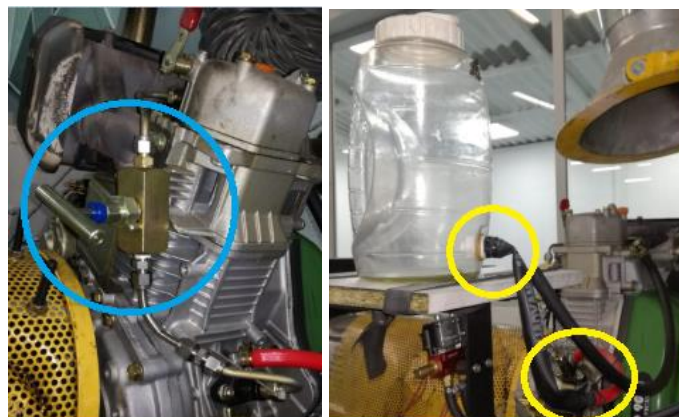
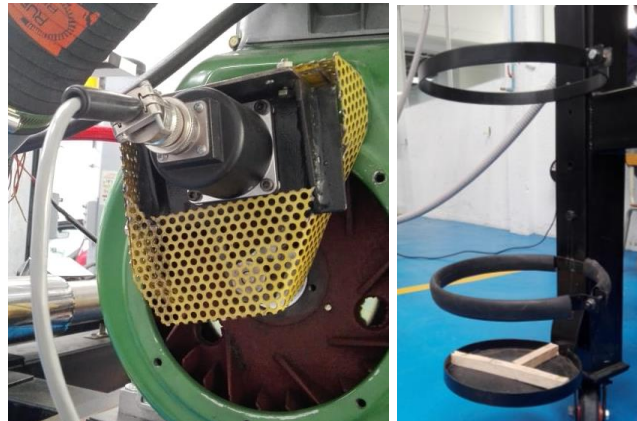


Figura 9. Válvula de caudal y tanque almacenamiento del Diésel

Por seguridad se instalaron mallas de acero en los elementos que se encontraban en movimiento al momento de iniciar las pruebas y se hizo la construcción de un soporte para el cilindro de gas licuado de petróleo, con el fin de disminuir las vibraciones del banco sobre el cilindro.



*Figura 10. Mallas de seguridad y base del cilindro de GLP*



*Figura 11. Banco de pruebas vista superior*

## **6.2 Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental consistió en 4 pruebas distintas con Diésel solo y las mezclas Diésel-GLP 1, Diésel-GLP 2 y por ultimo Diésel-GLP 3, a continuación, se describe paso a paso el procedimiento, cabe mencionar que este se repite en cada prueba. Con el fin de recolectar datos precisos en las pruebas experimentales se

diseñaron las tablas 4, 5 y 6, estas reúnen los datos específicos que se quieren obtener para evitar confusiones en la toma cuantiosa de los valores.

### 6.2.1 Pruebas

Inicialmente se enciende el motor y se deja calentar aproximadamente 5 minutos a 2700 rpm, esto con el fin de que se establezcan sus condiciones de funcionamiento tales como la temperatura del aceite y las emisiones.

Posteriormente, se da paso a la primera prueba acelerando el motor hasta llevarlo a 3300 rpm, para controlar y mantener las revoluciones es necesario verificar constantemente en el programa del sistema electrónico, luego se aplica una carga de 132.2 kPa que genera una potencia de 1.51 kW, se espera hasta que las revoluciones por minuto sean estables y seguidamente se inicia la toma de los siguientes datos, los cuales deben tomarse al mismo tiempo.

- Primero, en la Tabla 4 se registran los datos iniciales y finales del consumo de combustible, es decir, se anota el peso del combustible inicial y de inmediato se da inicio al conteo de treinta segundos con ayuda de un cronometro, cuando el tiempo se acaba se procede a tomar el valor final del combustible dado por la gramera digital y se anota el tiempo entre la toma de ambos datos. Por otra parte, en la columna 5 para la masa total se halla el valor de la diferencia entre el inicial menos el final.

Tabla 4. Medición de combustible

Prueba	Potencia (W)	m fuel inicial (gr)	m fuel final (gr)	m total (gr)	Tiempo (s)
1					

- Segundo, en la Tabla 5 se registran los datos entregados por el sistema de control electrónico, este monitorea la operación del banco antes y después de introducir las cargas, para el caso de la carga generadora de 1.51 kW previamente mencionada, se corrobora que los rpm sean iguales y si no es el caso, se abre la válvula de mariposa del motor que aumenta el flujo de combustible al cilindro, esto con el fin de llegar a los 3300 rpm o aproximarse.

Después de corroborar la estabilidad de las condiciones de funcionamiento del motor, se toman datos como la potencia, torque, temperaturas de admisión,

escape y aceite. Finalmente es importante hallar la velocidad angular, ya que más adelante será necesaria para la ecuación 4 de potencia al freno.

Tabla 5. Medición Electrónica

Prueba	Torque (V)	RPM	V. aire (V)	T. Adm (°C)	T. Esc (°C)	T. Ace (°C)	Torque (Nm)	Vel. ang (r/seg)
1								

- Por último, en la Tabla 6 se registran los datos tomados por el analizador de gases conectado a un computador; sin embargo, el programa se debe calibrar en la opción de ajustes y en ella se indica la cantidad de cilindros y de tiempos del motor. Seguido se presiona el botón de iniciar y automáticamente el programa dice calibración en curso, cuando la pantalla de calibración desaparece el programa empieza a tomar datos, por ende, se introduce la sonda al tubo de escape y se espera hasta que los valores de los gases de escape en el monitor se estabilicen o varíen poco.

Se recomienda limpiar la sonda o cable del analizador de gases con ayuda de un compresor después de cada toma, para que no se afecten los próximos datos a tomar.

- En otra instancia, con ayuda de un termómetro higrómetro digital se toman los datos de temperatura ambiente y humedad relativa, estos valores se toman siempre de ultimas, es decir, después de tener los datos de los gases de escape son el analizador de gases.

Tabla 6. Medición de gases

Prueba	CO (%)	O2 (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	HC (%)	HR (%)	TOTAL (%)	T. amb (°C)
1								

Después de terminar este procedimiento con la primera carga, se repite el registro de los datos para las cargas 206.4, 258.5, 306.6 y 324.6 kPa.

Al finalizar los registros de los datos para las cargas ya mencionadas, es necesario quitar la carga y proceder a apagar el motor, para dejarlo enfriar y así comenzar el procedimiento de nuevo.

Pasado más o menos 5 minutos, se repite el procedimiento anteriormente mencionado para cada mezcla de Diésel-GLP, sin embargo, esta vez se debe tener en cuenta el caudal del GLP suministrado, este caudal es controlado por un flujómetro que mide en Standard Cubic Feet per Hour (SCFH). Antes de frenar el motor con las cargas se abre la válvula de paso del gas licuado de petróleo y se toman datos para cada uno.

En la Tabla 7 se registran los tres caudales usados en la práctica y su valor real correspondiente en flujo volumétrico (gr/s):

*Tabla 7. Flujo de GLP para las tres diferentes pruebas*

DESIGNACION	Caudal (SCFH)	ṁ GLP (gr/s)
Diésel-GLP 1	5	4,88E-08
Diésel-GLP 2	10	9,77E-08
Diésel-GLP 3	15	1,47E-07

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con los cuatro tipos de combustibles respecto a su mezcla, evidenciando el comportamiento de cada una de estas respecto a las mismas cargas, siguiendo el mismo procedimiento y procurando que este sea un causante de cambio en las condiciones de las pruebas.

### 7.1 Consumo específico del combustible

Tabla 8. Resultados del consumo específico de combustible el freno para cada prueba

BSFC				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	
BSFC (g/kWh)	BSFC (g/kWh)	BSFC (g/kWh)	BSFC (g/kWh)	BMEP [kPa]
893,86817	989,62027	759,83701		136,28600
515,97639	579,50229	489,61334	404,82831	206,43320
479,86853	496,09323	403,08476	340,92781	258,54255
505,39232	452,99545	370,31146	295,55030	306,64349
1475,31867	549,47831	513,59839	394,21786	324,68135

Podemos evidenciar en la Figura 12 que la mezcla Diésel-GLP 1 tiene un 11% más de consumo a bajas cargas con respecto al Diésel, pero al trabajar con cargas elevadas es mejor utilizar la mezcla Diésel-GLP 1 con un ahorro del 62%. El consumo específico de combustible en las mezclas Diésel-GLP 2 tiene un ahorro del 29% y Diésel-GLP 3 45%, siendo una opción favorable para disminuir el consumo en cargas que pueden ser bajas o altas.

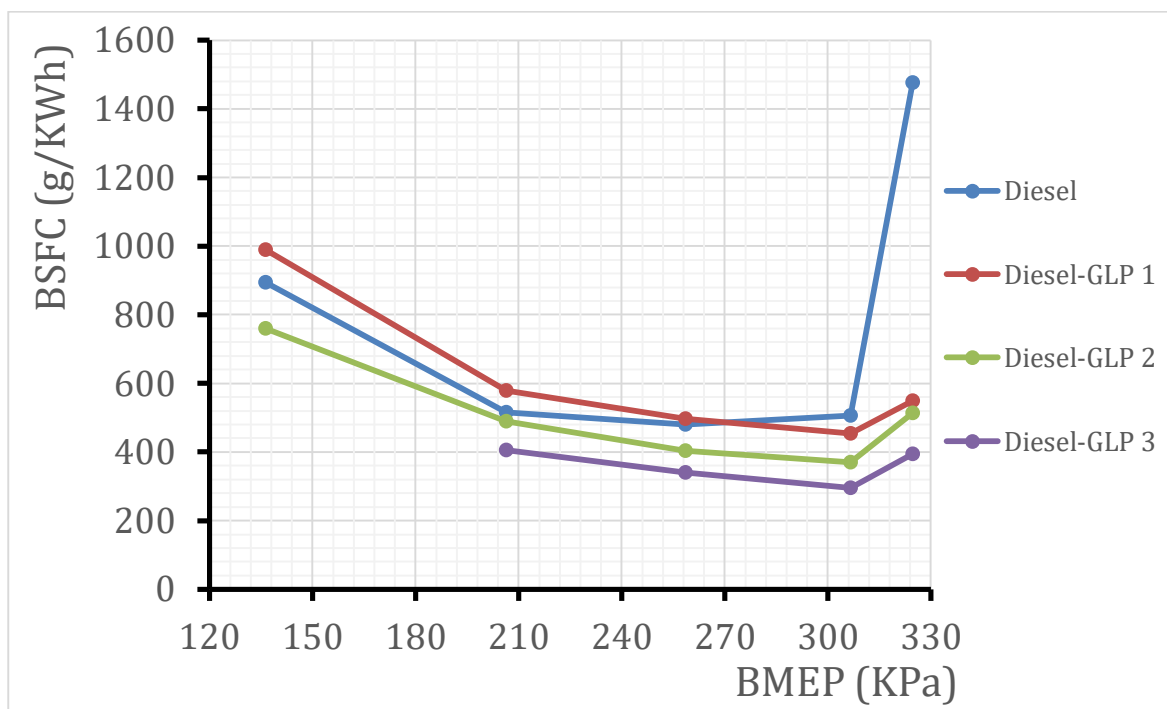


Figura 12. Consumo específico de combustible



## 7.2 Eficiencia Térmica

Tabla 9. Resultados de la eficiencia térmica para cada prueba

Eficiencia Térmica				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	
$\eta$ térmica	$\eta$ térmica	$\eta$ térmica	$\eta$ térmica	BMEP [kPa]
9,30	8,41	10,94		136,2859971
15,87	14,25	16,77	20,25	206,4332015
17,07	16,64	20,31	24,31	258,5425533
16,24	18,09	22,11	27,74	306,6434935
5,60	15,29	15,96	21,50	324,681346

En consecuencia, a la Figura 13, se puede apreciar que la eficiencia térmica depende de la cantidad de combustible que entra al cilindro, entre menos Diésel se incorpore al cilindro el motor va aprovechar mejor el calor producido por la combustión de las mezclas. Esto se evidencia en el consumo específico de combustible de la Figura 12, sabiendo que el volumen de aire dentro del cilindro solo se puede ver afectado por la temperatura ambiente cuando se hicieron las pruebas, la cantidad de combustible hace la diferencia de que la mezcla pueda ser rica o pobre en aire, ya que el aire dentro del motor es constante. Esto quiere decir que entre menos combustible ingrese al cilindro, la relación aire combustible será mejor como lo es en este caso respecto al Diésel. Para la mayor carga aplicada en el Diésel se evidencia una disminución del 64 %, por otra parte, las mezclas de diésel-GLP 1, diésel-GLP 2 y diésel-GLP 3 presentaron una reducción en la eficiencia térmica de 46 %, 73 % y 75 % correspondientemente.

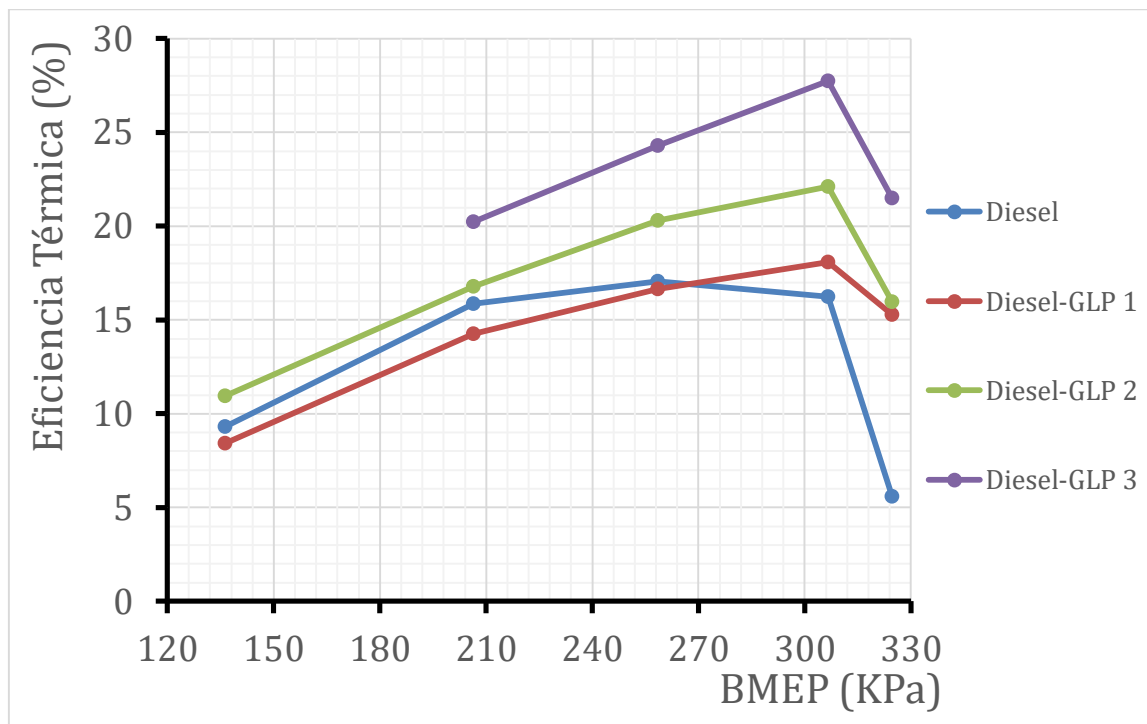


Figura 13. Eficiencia térmica

### 7.3 Eficiencia Volumétrica

Tabla 10. Resultados de la eficiencia volumétrica para cada prueba

Eficiencia Volumétrica				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	BMEP [kPa]
$\eta$ volumétrica	$\eta$ volumétrica	$\eta$ volumétrica	$\eta$ volumétrica	
72,03	79,99	80,84		136,2859971
75,05	74,92	76,88	76,79	206,4332015
73,38	75,63	76,96	75,27	258,5425533
74,97	79,06	77,62	77,26	306,6434935
72,59	77,99	79,76	75,32	324,681346

Podemos observar en la tabla 11 los valores promedios de la temperatura ambiente y la humedad relativa con los que se realizó cada prueba, dado que la temperatura influye directamente en la eficiencia volumétrica del motor, esta disminuye la densidad del aire. De la Figura 14 se puede inferir que a menor temperatura mayor humedad y, por ende, la eficiencia volumétrica para las mezclas es mayor en comparación con el diésel, ya que se presenta un aumento en el volumen del aire.

Tabla 11. Humedad relativa y temperatura ambiente

	HR (%)	Temperatura ambiente (°C)
Diésel	37,2	26,18
Diésel-GLP 1	63,6	20,92
Diésel-GLP 2	61,8	21,48
Diésel-GLP 3	60,5	22,075

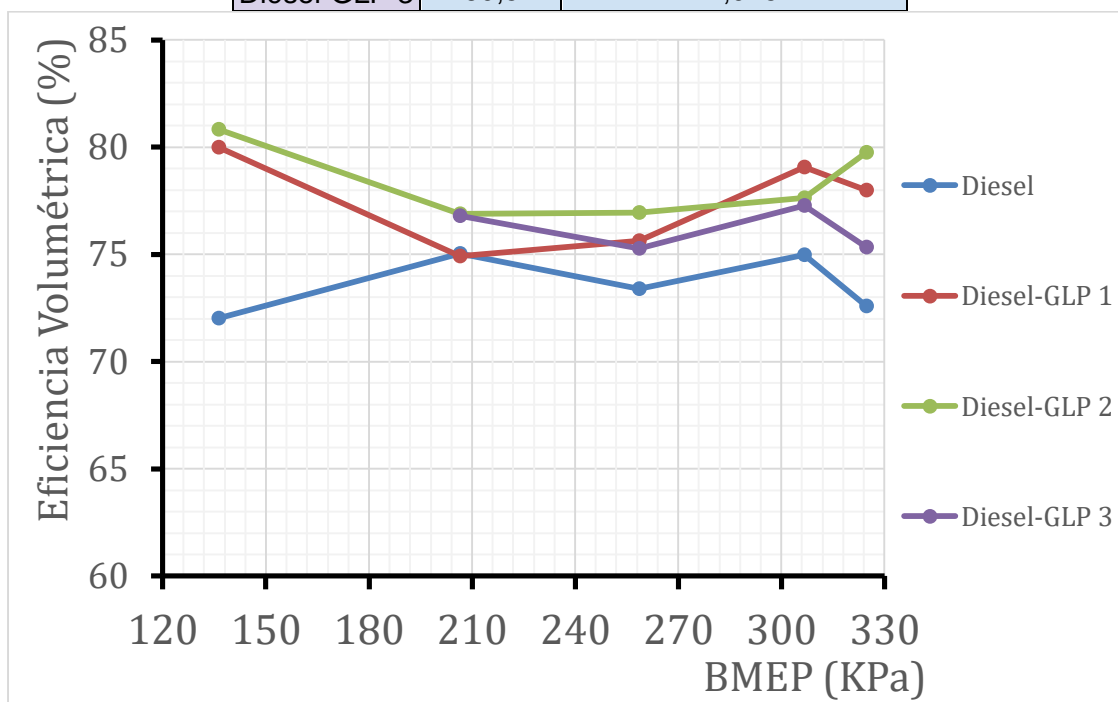


Figura 14. Eficiencia volumétrica



## 7.4 Emisiones de Dióxido de Carbono

Tabla 12. Resultados de las emisiones de dióxido de carbono para cada dato

BSCO <sub>2</sub>				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	
BSCO <sub>2</sub> (g/kWh)	BSCO <sub>2</sub> (g/kWh)	BSCO <sub>2</sub> (g/kWh)	BSCO <sub>2</sub> (g/kWh)	BMEP [kPa]
5887,13654	8316,76463	8452,35399		136,28600
4391,10105	4303,57854	4972,53485	6071,79084	206,43320
3714,31360	3525,43006	3279,99052	4445,60131	258,54255
3424,03055	3814,37182	3032,37697	3734,82993	306,64349
2470,23569	3359,95598	5032,77663	2764,64028	324,68135

Las emisiones de dióxido de carbono en la Figura 15 presentan tendencia decreciente, esto implica que a medida que la carga aumenta, el motor tiene una relación de aire-combustible pobre en aire, esto ocurre por la cantidad de combustible que se inyecta al cilindro cuando se abre la válvula de mariposa. En otra instancia, el porcentaje de disminución del CO<sub>2</sub> en las mezclas de GLP 1, GLP 2 y GLP 3 son del 7, 24 y 34 % respectivamente, solo cuando se aplica el 80 % de la carga, al variar solo un 4 % la eficiencia volumétrica, la combustión no es completa y, por ende, no hay suficiente oxígeno para reaccionar a CO<sub>2</sub>.

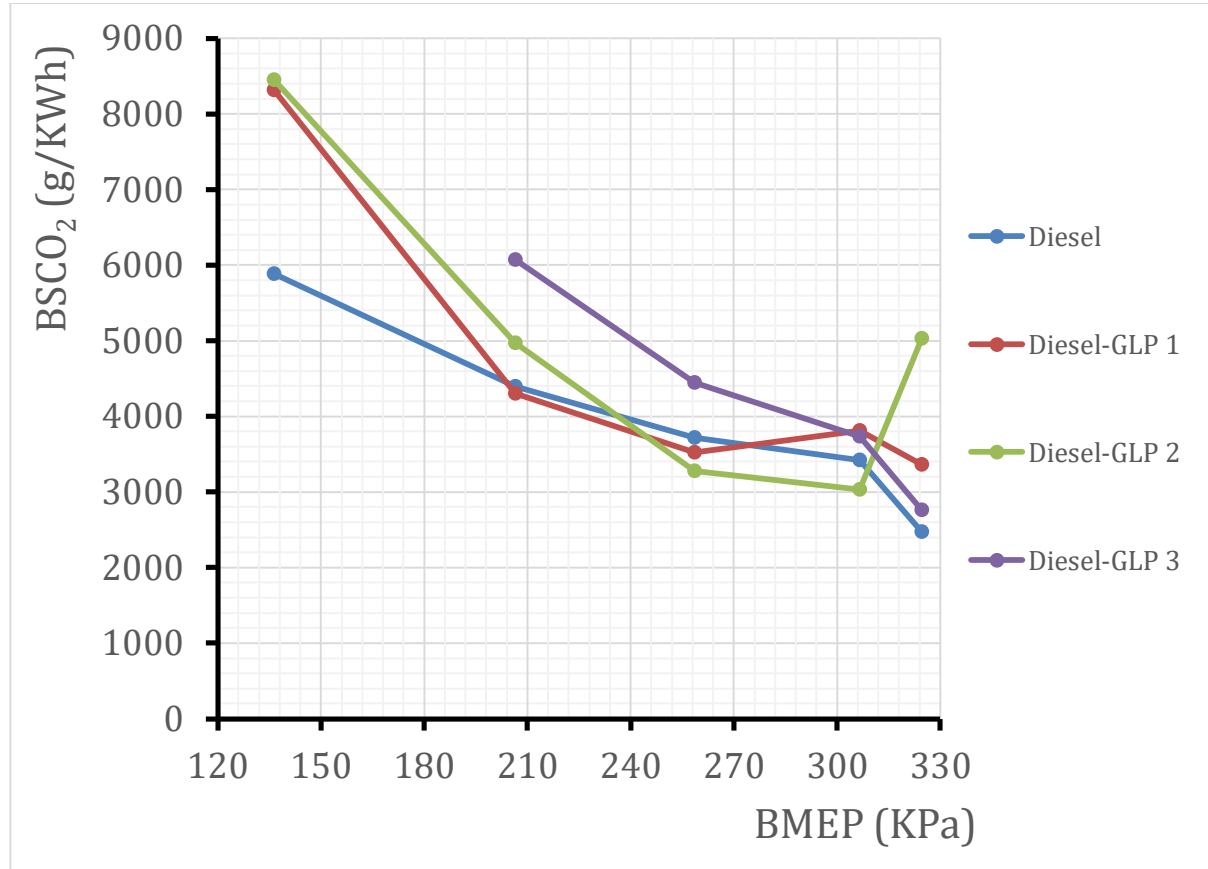


Figura 15. Emisión de Dióxido de carbono respecto al freno

## 7.5 Emisiones de Monóxido de Carbono

Tabla 13. Resultados de las emisiones de monóxido de carbono para cada prueba

BSCO				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	
BSCO (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BMEP [kPa]
2850,81341	361,65642	385,82782		136,28600
1487,86640	144,30339	180,61016	156,94572	206,43320
1378,44081	111,88241	85,04322	92,62338	258,54255
1160,03414	125,35186	79,72195	56,67234	306,64349
30943,92347	394,42914	662,16247	465,39571	324,68135

Las emisiones de monóxido de carbono están ligadas a las emisiones de dióxido de carbono, siendo inversamente proporcionales, ya que cuando ocurre la combustión dentro del cilindro si y solo si existe una mezcla pobre en aire entre aire-combustible, la reacción genera monóxido de carbono como consecuencia a la falta de oxígeno para reaccionar a dióxido de carbono. En la figura 16 el diésel produjo mayores emisiones de CO para todas las cargas aplicadas en comparación con las mezclas, se puede evidenciar que las emisiones en todos los casos tienden a aumentar cuando la carga es mayor.

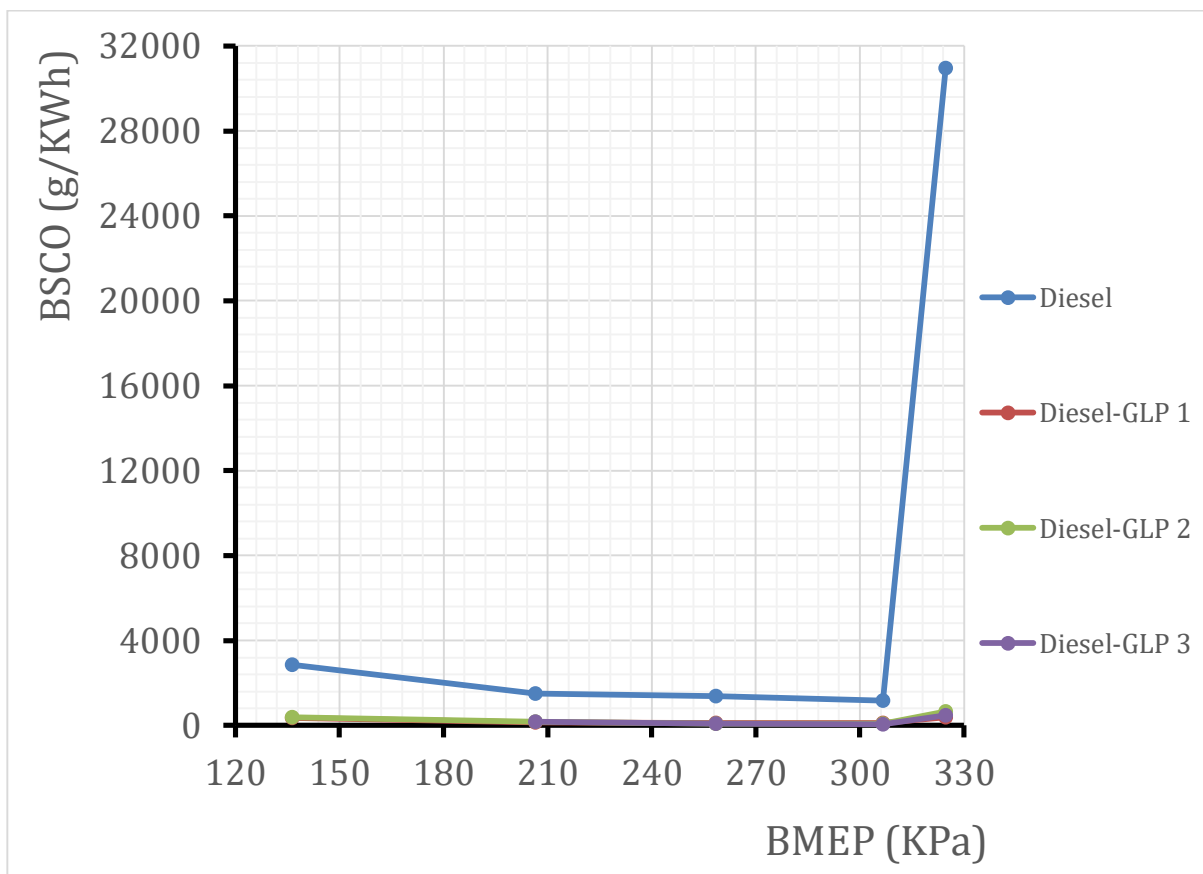


Figura 16. Emisión de Monóxido de carbono respecto al freno

## 7.6 Emisiones de hidrocarburos sin quemar

Tabla 14. Resultados de las emisiones de hidrocarburos sin quemar para cada prueba

BSHC				
Diésel	Diésel-GLP 1	Diésel-GLP 2	Diésel-GLP 3	
BSHC (g/kWh)	BSHC (g/kWh)	BSHC (g/kWh)	BSHC (g/kWh)	BMEP [kPa]
3,26718	5,65767	8,60714		136,28600
0,79078	1,45178	1,29302	1,60611	206,43320
0,35429	0,43059	0,34754	0,36144	258,54255
0,30333	0,21360	0,24692	0,09055	306,64349
34,65211	1,02485	1,98194	1,67901	324,68135

Los usos de las mezclas a bajas cargas no son adecuados por la generación que se puede evidenciar en la Figura 17 de hidrocarburos sin quemar, incrementando un 73 % hasta 163 % los HC. Siendo importante que, si queremos tener bajas emisiones de HC con respecto al combustible Diésel, tenemos que hacer trabajar al motor con altas cargas la cuales hacen que disminuyan estas emisiones después del 80 % de la carga.

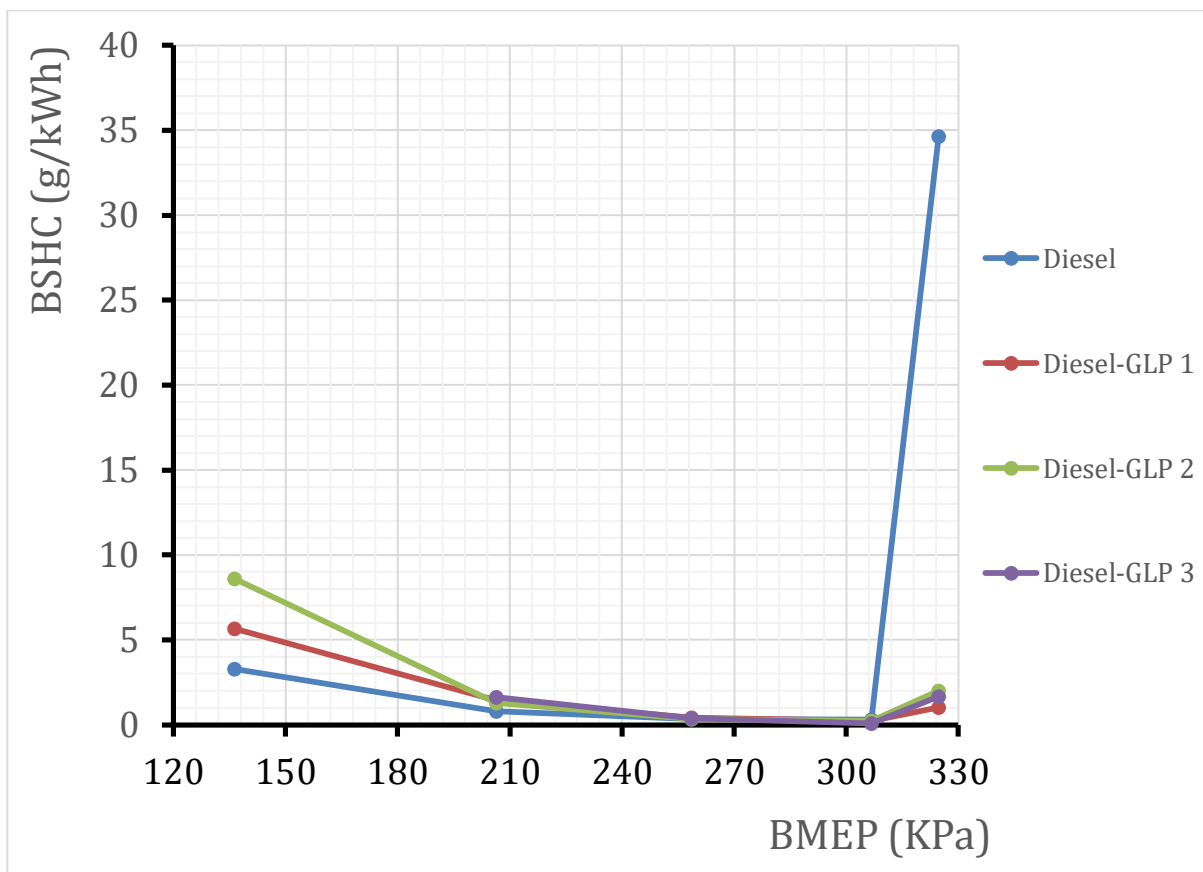


Figura 17. Emisión de Hidrocarburos sin quemar respecto al freno

## 7.7 Costo de operación por hora del motor

Tabla 15. Precio del Diésel y GLP en Colombia

Fuente: [27] [28]

PRECIO DEL COMBUSTIBLE	
Diésel (Kg)	GLP (Kg)
\$ 2.760	\$ 529

Tabla 16. Resultados del costo por hora según precios del combustible en Bogotá

COSTO POR HORA					
Diesel	Diesel-GLP 1	Diesel-GLP 2	Diesel-GLP 3	BMEP [kPa]	
\$ 3.863	\$ 3.764	\$ 2.800		136,286	
\$ 3.372	\$ 3.307	\$ 2.754	\$ 2.409	206,433	
\$ 3.930	\$ 3.671	\$ 3.020	\$ 2.622	258,543	
\$ 4.633	\$ 3.816	\$ 3.288	\$ 2.677	306,643	
\$ 15.012	\$ 5.401	\$ 8.058	\$ 4.018	324,681	

De acuerdo a la Figura 18 el consumo de combustible Diésel disminuye al mezclarlo con GLP, estos valores son positivos para la investigación ya que cumple con uno de los objetivos específicos. El costo para la mezcla diésel-GPL 1 disminuye tan solo 2 % cuando se le aplica una carga del 20%, siendo este valor el más pequeño, sin embargo, tiene una disminución del 64 % para la carga aplicada de 100 %. Por otra parte, la mezcla diésel-GPL 2 reduce el costo del combustible para bajas cargas en un 27 % y para la mayor carga, es decir el 100 % lo redujo en un 46 %. Por último, la mezcla diésel-GPL 3 redujo costos en un 28 % para bajas cargas y un 73 % para la carga más alta. Cabe resaltar que estos porcentajes salen de la relación entre el diésel como referente y los costos de las mezclas registrados en la Tabla 16.

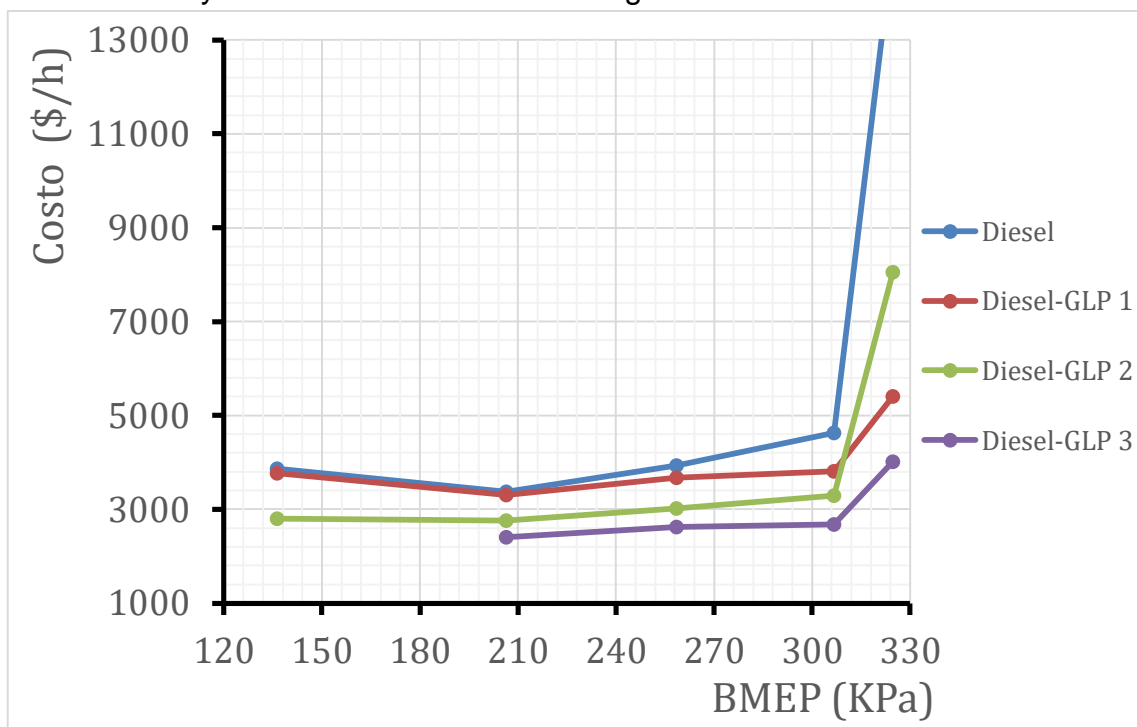


Figura 18. Costo por hora del combustible

## 8. CONCLUSIONES

El uso de las mezclas de Diésel-GLP sin precalentar por debajo del 80% de la carga no son recomendables debido a que la relación de combustión dentro del cilindro es pobre en aire, lo que no permite que se aproveche esta mezcla, generando hasta un 163% de emisiones de HC con respecto al Diésel, a diferencia de cuando el motor trabaja con cargas en un intervalo del 80 % al 100 %, lo cual permite que estas emisiones bajen desde el 18% hasta el 97% dependiendo la carga.

Si se desea disminuir el consumo de Diésel se recomienda aumentar el porcentaje de GLP en la mezcla de combustible, ya que en comparación a la mezcla Diésel-GLP 2 y Diésel-GLP 3 sin precalentar el consumo específico de combustible tuvo una disminución del 20 %, que puede generar un ahorro económico de 4000 pesos-hora siendo este significativo para la generación de energía.

La disminución de las emisiones del CO y el aumento del CO<sub>2</sub> confirma que las mezclas de Diésel-GLP sin precalentar tienen una relación de aire-combustible rica en aire mínima del 12% y máxima del 178% en relación al diésel, permitiendo que el oxígeno que se obtiene del aire reaccione adecuadamente con el CO hasta producir CO<sub>2</sub>, siendo este un indicador de eficiencia del motor.

El aumento de la eficiencia térmica del 5% hasta el 284% respecto al diésel es un indicador positivo del desempeño del motor al trabajar con la mezcla Diésel-GLP sin precalentar, corroborando que esta mezcla es efectiva para los motores de encendido por compresión y que es una posible alternativa de combustible para la generación de energía eléctrica.

En comparación a las mezclas de diésel-GLP sin precalentar, una de las que presento mejores resultados fue diésel-GLP 3, puesto que tiene una eficiencia térmica mínima del 27% y máxima del 284%, una reducción del consumo de diésel en promedio del 44% respecto al diésel. Sin embargo, uno de los factores a tener en cuenta para esta mezcla es la carga con la que funciona óptimamente, ya que con cargas inferiores al 40% el motor no estabilizaba por la deficiencia de masa del aire y las bajas revoluciones por minuto con las que este trabajaba.

## RECOMENDACIONES

- Para tener un mejor control en el paso de GLP se recomienda que se pongan en funcionamiento los inyectores eléctricos del banco de pruebas.
- Se recomienda adecuar una caja de cambios para controlar las revoluciones por minuto del motor y que no opere con las mismas.
- Realizar pruebas con el fin de encontrar la capacidad máxima de GLP con la que puede operar el motor de encendido por compresión.
- Para obtener una lectura de  $\text{NO}_x$  se debe realizar el mantenimiento al analizador de gases con el fin de que opere óptimamente.
- Con el fin de poder implementar esta combinación de Diésel-GLP en motores de encendido por compresión para vehículos, se recomienda realizar estas pruebas en motores de más de 4 cilindros, para analizar la viabilidad.

## REFERENCIAS

- [1] G. Çağatay, "Consumo de energía mundial aumentó un 2,9 por ciento en 2018", *Aa.com.tr*, 2019. <https://www.aa.com.tr/es/mundo/consumo-de-energ%C3%ADa-mundial-aument%C3%B3-un-2-9-por-ciento-en-2018/1502721>.
- [2] EL HERALDO-ECONOMÍA, "Producción de gas y petróleo en Colombia aumentó 8,6% en agosto", 2019.
- [3] EL NUEVO SIGLO-ECONOMÍA, "Demanda de energía crecerá 69% respecto al promedio mundial", 2019.
- [4] W. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1997.
- [5] A. ESLAVA SARMIENTO, "GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN MODO DUAL CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO E HIDRÓGENO", Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [6] J. Vivas, "Los 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en el país", *EL TIEMPO*, 2019.
- [7] Heywood, J. (1988). *Internal combustion engine fundamentals* (pp. 10-50). New York: McGraw-Hill.
- [8] E. Kates and W. Luck, *Motores Diesel y de gas de alta compresión*. Barcelona: Reverté, 1982, pp. 1-80.
- [9] F. Lozano Cortés, "Ciclo otto/ diesel", *Es.slideshare.net*, 2012. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/fran8melen/ciclo-otto-diesel>.
- [10] m. Aiz and U. almería, "Elementos y sistemas de un motor de combustión interna", *Motores y Máquinas Agrícolas*, pp. 34-40, 2010.
- [11] R. Montagne Velásquez, "DISEÑO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN DE CICLO OTTO EN LA REGIÓN PUNO", Ingeniero mecánico electricista, Universidad Nacional del Altiplano, 2016.
- [12] "Combustibles - Enciclopedia | Banrepcultural", *Enciclopedia.banrepcultural.org*, 2017. Available: <https://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php/Combustibles>.

- [13] "El gasoil o diésel: todo lo que deberías saber", Ro-des.com, 2019. [Online]. Available: <https://www.ro-des.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil/>.
- [14] "¿Qué es el GLP? | Unigas Colombia", *Unigas.com.co*. [Online]. Available: <http://www.unigas.com.co/nosotros/que-es-glp>.
- [15] C. Santaella, "Estequiometría - Monografias.com", *Monografias.com*. Available: <https://www.monografias.com/trabajos87/la-estequiometria/la-estequiometria.shtml>.
- [16] J. Melendez, "FRACCIÓN MÁSCICA, MOLAR Y VOLUMÉTRICA", *prezi.com*, 2013. Available: [https://prezi.com/1ldpqpli\\_6hd/fraccion-masica-molar-y-volumetrica/](https://prezi.com/1ldpqpli_6hd/fraccion-masica-molar-y-volumetrica/).
- [17] "presión media efectiva al freno / Bmep", FullMecanica, 2019. [Online]. <http://www.fullmecanica.com/definiciones/p/1393-presion-media-efectiva-al-freno>.
- [18] C. Portillo y A. Hernandez, diseño y construcción de un banco de pruebas de un motor diésel, Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.
- [19] j. satorra, "Tipos de gases producidos en la combustión y sus consecuencias", Els Blogs d'en Jaume Satorra, 2010. [Online]. <https://jaumesatorra.wordpress.com/2010/01/27/tipos-de-gases-producidos-en-la-combustion-y-sus-consecuencias/>.
- [20] D. Meganeboy, "Emisión de Gases de Escape en Motores Gasolina y Diesel", Aficionadosalamecanica.net, 2014. [Online]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>.
- [21] "Why convert to LPG?", myLPG.eu. <https://www.mylpg.eu/useful/why-lpg/#performance>.
- [22] MCKIWEN, "Solaris diesel, un sistema GLP para vehículos de gasóleo", Motorpasion.com, 2012. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/solaris-diesel-un-sistema-glp-para-vehiculos-de-gasoleo>.
- [23] F. Segovia y F. Molina, Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diésel con la finalidad de reducir la contaminación del aire, 2005.
- [24] D. V. Vásquez, Falencias del almacenamiento del GLP en Chile, Universidad Concepción Chile, 2017.
- [25] M. Chaparro, "Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano", Maestría en ingeniería de petróleos, Universidad Nacional de Colombia, 2015.



[26]J. Benavides, "COMPORTAMIENTO ESTÁNDAR DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN OPERADO CON SUSTITUCIÓN DE GLP Y COMBUSTIBLE PILOTO DIÉSEL A CONDICIONES DE BOGOTÁ", Ingeniero mecánico, Universidad Libre de Colombia, 2019.

[27]"Colombia precios del diésel, 07-oct-2019 | GlobalPetrolPrices.com", GlobalPetrolPrices.com, 2019. [Online]. Available: [https://es.globalpetrolprices.com/Colombia/diesel\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/Colombia/diesel_prices/).

[28]"Tarifas GLP", Ecopetrol.com.co, 2019. [Online]. Available: [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/precios/precios-vigentes/tarifas-glp!/ut/p/z0/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy93S2DXQwcjUI9Td1CjTzMvU30C7ldFQEk37y0/](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/precios/precios-vigentes/tarifas-glp!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy93S2DXQwcjUI9Td1CjTzMvU30C7ldFQEk37y0/).

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1: ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL**

Antes de realizar el procedimiento experimental debemos tener en cuenta los elementos de seguridad necesarios para evitar consecuencias si ocurre un fallo en el sistema las cuales son:

- Gafas protectoras
- Guantes de carnaza (si se operan elemento con alta temperatura)
- Máscaras de gas
- Botas punta de acero
- Overol cuerpo completo o Bata
- Encender el extractor de gases
- No tener elemento como que puedan enredarse con las partes giratorias

## ANEXO 2: CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL

En las siguientes tablas se registran los datos experimentales tomados durante las pruebas con Diésel, en total se realizaron 3 pruebas por cada medición.

### 2.1 Medición del combustible

Prueba	Potencia (W)	m fuel inicial (gr)	m fuel final (gr)	m total final (gr)	Tiempo (s)
1	600	1150	1130	20	60
	1250	1040	1020	20	60
	1850	792	767,5	24,5	60
	2450	1525	1496,5	28,5	60
	3100	1329	1248	81	60
2	600	1795	1767	28	60
	1250	1714,5	1693	21,5	60
	1850	1623	1600,3	22,7	60
	2450	1574	1517,1	56,9	120
	3100	1410	1307	103	60
3	600	970,5	959,5	11	30
	1250	1028,8	1019	9,8	30
	1850	1089	1077	12	30
	2450	1180	1166,5	13,5	30
	3100	1400	1356	44	30

### 2.2 Medición de los gases de escape

Prueba	CO (%)	O2 (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	HC (%)	HR (%)	H2O (%)	N2 (%)	TOTAL (%)	T. amb (°C)
1	0,41	11,5	6,8	177	0,0177	42	1,2373	16,9316	36,89657	24,5
	0,29	10,9	6,8	56	0,0056	37	1,2373	17,7205	36,95344	26
	0,39	10,4	7,3	27	0,0027	35	1,5157	17,3529	36,96128	26,9
	0,58	8,73	8,4	36	0,0036	36	1,7632	16,1938	35,67055	26,8
	8	5,47	5,1	2112	0,2112	36	5,0111	16,0602	39,85257	26,7
2	0,39	13,2	5,4	82	0,0082	39	1,7322	16,6343	37,36470	26,7
	0,28	11,9	6	41	0,0041	38	1,3301	17,0183	36,53255	26,7
	0,3	11,5	6,3	28	0,0028	38	1,4044	16,2891	35,79622	26,7
	0,28	10,5	7	20	0,002	38	3,5202	33,3223	54,62444	26,7
	9,51	3,62	5,3	2623	0,2623	38	6,3722	17,1163	42,18076	26,7
3	0,38	12,8	5,6	79	0,0079	41	0,6805	8,16524	27,63366	26,7
	0,32	11,8	6,5	25	0,0025	41	0,6063	8,61908	27,84786	26,7
	0,36	10,7	7,1	14	0,0014	41	0,7424	8,61835	27,52213	26,7
	0,31	9,59	8	17	0,0017	41	0,8352	8,06649	26,80338	26,7
	10,08	3,15	5,6	2800	0,28	43	2,7221	8,29915	30,13124	26,7

## 2.3 Medición tomada por el sistema electrónico

Prueba	Torque (V)	RPM	V. aire (V)	T. Adm (°C)	T. Esc (°C)	T. Ace (°C)	Torque (Nm)	Vel. ang (r/seg)
1	5,22	3280	1,7210	30	426	67	4,4	343,48080
	5,35	3275	1,7593	31	472	86	7	342,95720
	5,42	3311	1,7412	33	515	91	8,4	346,72711
	5,5	3297	1,6870	31	615	95	10	345,26103
	5,54	3260	1,6810	28	545	100	10,8	341,38640
2	5,23	3291	1,7071	27	400	78	4,6	344,63271
	5,35	3305	1,7251	23	485	85	7	346,09879
	5,43	3280	1,6913	27	515	90	8,6	343,48080
	5,52	3296	1,7083	25	575	91	10,4	345,15631
	5,54	3260	1,7298	28	560	91	10,8	341,38640
3	5,23	3310	1,6931	27	495	90	4,6	346,62239
	5,33	3300	1,7356	26	517	92	6,6	345,57519
	5,44	3298	1,7356	26	535	90	8,8	345,36575
	5,51	2781	1,6842	29	577	88	10,2	291,22564
	5,54	3261	1,7054	25	548	90	10,8	341,49112

## 2.4 Valores calculados

Los siguientes datos fueron hallados con las ecuaciones mencionadas en el marco teórico y se encuentran registrados a continuación:

### 2.4.1 Diésel

Prueba	ṁ fuel (gr/s)	%Diésel (gr)	%Biodiesel (gr)	Diésel (mol)	Biodiesel (mol)	TOTAL FUEL (mol)	BSFC (g/kWh)
1	0,33333333	18,0	2,0	0,0876514	0,0064409	0,0940923	794,01024
	0,33333333	18,0	2,0	0,0876514	0,0064409	0,0940923	499,85412
	0,40833333	22,1	2,5	0,1073729	0,0078901	0,1152631	504,71969
	0,47500000	25,7	2,9	0,1249032	0,0091783	0,1340815	495,27743
	1,35000000	72,9	8,1	0,3549881	0,0260857	0,3810738	1318,1544
2	0,46666667	25,2	2,8	0,1227119	0,0090173	0,1317292	1059,7293
	0,35833333	19,4	2,2	0,0942252	0,0069240	0,1011492	532,46564
	0,37833333	20,4	2,3	0,0994843	0,0073104	0,1067948	461,07990
	0,47416667	51,2	5,7	0,2493682	0,0183244	0,2676926	475,53705
	1,71666667	92,7	10,3	0,4514046	0,0331708	0,4845754	1676,1716
3	0,36666667	9,9	1,1	0,0482083	0,0035425	0,0517508	827,86493
	0,32666667	8,8	1,0	0,0429492	0,0031561	0,0461052	515,60940
	0,40000000	10,8	1,2	0,0525908	0,0038646	0,0564554	473,80599
	0,45000000	12,2	1,4	0,0591647	0,0043476	0,0635123	545,36245
	1,46666667	39,6	4,4	0,1928330	0,0141700	0,2070031	1431,6298

## 2.4.2 Aire de entrada

Prueba	$\dot{m}$ air (gr/s)	m air (gr)	air(mol)
1	10,30551	618,33058	21,43235
	10,78572	647,14327	22,43105
	10,56195	633,71677	21,96566
	9,85645	591,38719	20,49845
	9,77518	586,51082	20,32943
2	10,12456	607,47352	21,05603
	10,35833	621,49980	21,54220
	9,91445	594,86727	20,61908
	10,14092	1216,91013	42,18011
	10,41795	625,07695	21,66619
3	9,93965	298,18964	10,33574
	10,49212	314,76358	10,91022
	10,49123	314,73693	10,90930
	9,81945	294,58356	10,21075
	10,10267	303,07995	10,50525

## 2.4.3 Parámetros del desempeño del motor

Teniendo en cuenta que en las ecuaciones de BMEP y  $\eta$  volumétrica se necesita el volumen desplazado o también conocido como cilindraje, el valor usado es de:

Vd (m <sup>3</sup> )
0,000418

Prueba	BP (W)	BMEP [kPa]	m TOTAL (gr)	$\dot{m}$ TOTAL (gr/s)	AF (gr air/gr fuel)	$\eta$ térmica	$\eta$ volumétrica
1	1511,3155	132,2776	638,3306	10,6388	30,9165	0,1030	0,7363
	2400,7004	210,4416	667,1433	11,1191	32,3572	0,1637	0,7718
	2912,5077	252,5299	658,2168	10,9703	25,8660	0,1621	0,7476
	3452,6103	300,6309	619,8872	10,3315	20,7504	0,1652	0,7006
	3686,9731	324,6813	667,5108	11,1252	7,2409	0,0621	0,7027
2	1585,3105	138,2902	635,4735	10,5912	21,6955	0,0772	0,7210
	2422,6915	210,4416	642,9998	10,7167	28,9070	0,1537	0,7345
	2953,9349	258,5426	617,5673	10,2928	26,2056	0,1774	0,7084
	3589,6257	312,6561	1273,8101	10,6151	21,3868	0,1721	0,7210
	3686,9731	324,6813	728,0770	12,1346	6,0687	0,0488	0,7489
3	1594,4630	138,2902	309,1896	10,3063	27,1081	0,0988	0,7037
	2280,7963	198,4164	324,5636	10,8188	32,1187	0,1587	0,7451
	3039,2186	264,5552	326,7369	10,8912	26,2281	0,1727	0,7455
	2970,5015	306,6435	308,0836	10,2695	21,8210	0,1500	0,8275
	3688,1041	324,6813	347,0800	11,5693	6,8882	0,0572	0,7260

## 2.4.4 Fracciones molares y másicas

Fracciones molares							
Prueba	YCO2	YCO	YO2	YHC	YH2O	YN2	TOTAL Y*masa molecular
1	0,1842990	0,0111121	0,3116821	0,0004797	0,0335347	0,4588925	31,86112875
	0,1840153	0,0078477	0,2949657	0,0001515	0,0334830	0,4795366	31,79541838
	0,1975040	0,0105516	0,2813755	0,0000730	0,0410080	0,4694879	31,88295361
	0,2354884	0,0162599	0,2447397	0,0001009	0,0494294	0,4539817	32,25991381
	0,1279717	0,2007399	0,1372559	0,0052995	0,1257415	0,4029916	29,27016128
2	0,1445214	0,0104377	0,3532746	0,0002195	0,0463603	0,4451866	31,26627845
	0,1642371	0,0076644	0,3257369	0,0001122	0,0364090	0,4658405	31,57301521
	0,1759962	0,0083808	0,3212629	0,0000782	0,0392318	0,4550500	31,71556951
	0,1281478	0,0051259	0,1922216	0,0000366	0,0644429	0,6100252	30,18447076
	0,1256497	0,2254582	0,0858211	0,0062185	0,1510681	0,4057844	28,76095146
3	0,2026514	0,0137513	0,4632032	0,0002859	0,0246266	0,2954816	32,85053063
	0,2334111	0,0114910	0,4237309	0,0000898	0,0217713	0,3095059	33,21674884
	0,2579742	0,0130804	0,3887780	0,0000509	0,0269742	0,3131424	33,41891899
	0,2984698	0,0115657	0,3577907	0,0000634	0,0311598	0,3009506	33,901164
	0,1858536	0,3345365	0,1045427	0,0092927	0,0903411	0,2754333	30,35929062

Fracciones másicas						
Prueba	XCO2	XCO	XO2	XHC	XH2O	XN2
1	0,2545705	0,0097690	0,3130288	0,0001960	0,0189615	0,4034740
	0,2547041	0,0069134	0,2968525	0,0000620	0,0189715	0,4224964
	0,2726238	0,0092699	0,2823979	0,0000298	0,0231714	0,4125073
	0,3212571	0,0141179	0,2427588	0,0000407	0,0276034	0,3942221
	0,1924133	0,1920982	0,1500512	0,0023571	0,0773917	0,3856885
2	0,2034241	0,0093506	0,3615513	0,0000914	0,0267123	0,3988703
	0,2289294	0,0067995	0,3301297	0,0000463	0,0207746	0,4133205
	0,2442178	0,0074016	0,3241319	0,0000321	0,0222847	0,4019319
	0,1868417	0,0047567	0,2037757	0,0000158	0,0384621	0,5661480
	0,1922670	0,2195723	0,0954827	0,0028148	0,0946260	0,3952373
3	0,2714899	0,0117251	0,4511935	0,0001133	0,0135053	0,2519729
	0,3092508	0,0096898	0,4081941	0,0000352	0,0118078	0,2610223
	0,3397272	0,0109633	0,3722571	0,0000198	0,0145411	0,2624915
	0,3874648	0,0095559	0,3377133	0,0000244	0,0165585	0,2486832
	0,2694175	0,3086502	0,1101883	0,0039849	0,0536087	0,2541503

## 2.4.5 Masa emisiones de salida y emisiones específicas

Masa emisiones							
Prueba	m CO2 (gr)	m CO (gr)	m O2(gr)	m HC (gr)	m H2O (gr)	m N2(gr)	TOTAL m salida
1	162,50016	6,23587	199,81587	0,12512	12,10373	257,54982	638,33058
	169,92411	4,61224	198,04316	0,04140	12,65670	281,86566	667,14327
	179,44553	6,10158	185,87902	0,01963	15,25177	271,51924	658,21677
	199,14315	8,75150	150,48305	0,02525	17,11100	244,37324	619,88719
	128,43798	128,22760	100,16082	1,57339	51,65980	257,45122	667,51082
2	129,27065	5,94209	229,75626	0,05807	16,97496	253,47151	635,47352
	147,20157	4,37207	212,27331	0,02976	13,35808	265,76501	642,99980
	150,82091	4,57099	200,17327	0,01983	13,76231	248,21996	617,56727
	238,00090	6,05908	259,57157	0,02012	48,99337	721,16510	1273,81013
	139,98514	159,86552	69,51874	2,04938	68,89501	287,76316	728,07695
3	83,94186	3,62529	139,50437	0,03503	4,17568	77,90741	309,18964
	100,37155	3,14496	132,48495	0,01142	3,83237	84,71833	324,56358
	111,00141	3,58213	121,63013	0,00647	4,75112	85,76567	326,73693
	119,37154	2,94402	104,04391	0,00750	5,10140	76,61520	308,08356
	93,50943	107,12631	38,24417	1,38307	18,60649	88,21049	347,07995

Emisiones Especificas			
Prueba	BSCO2 (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSHC (g/kWh)
1	6451,3398	2828,5376	4,9674
	4246,8634	1315,0187	1,0346
	3696,7221	1449,7095	0,4045
	3460,7407	1746,6262	0,4387
	2090,1370	23696,0207	25,6046
2	4892,5677	2578,0945	2,1977
	3645,5710	1246,5424	0,7369
	3063,4577	1060,7907	0,4028
	1989,0729	581,3814	0,1681
	2278,0498	29542,6007	33,3507
3	6317,5022	3145,8081	2,6364
	5280,8688	1902,0380	0,6008
	4382,7611	1624,8223	0,2556
	4822,2780	1152,0948	0,3031
	3042,5203	39593,1489	45,0011

### ANEXO 3. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 1

En las siguientes tablas se registran los datos experimentales tomados durante las pruebas con la mezcla de Diésel-GLP 1, en total se realizaron 3 pruebas por cada medición.

#### 3.1 Medición del combustible

Prueba	Potencia (W)	m fuel inicial (gr)	m fuel final (gr)	m total final (gr)	Tiempo (s)
1	600	1535,5	1524,9	10,6	30
	1250	1459	1448,9	10,1	34,7
	1850	1415	1403,5	11,5	33,5
	2450	1350	1338	12	31
	3100	1278	1263,5	14,5	30,6
2	600	1392,5	1379	13,5	30
	1250	1311	1300,7	10,3	30,2
	1850	1255	1244	11	30,1
	2450	1200	1182	18	44,5
	3100	1038	1020	18	32,3
3	600	903	893	10	30
	1250	932	921	11	30
	1850	963	951	12	30
	2450	1013	1002	11	30,5
	3100	1077	1059	18	30

#### 3.2 Medición de los gases de escape

Prueba	CO (%)	O2 (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	HC (%)	HR (%)	H2O (%)	N2 (%)	TOTAL (%)	T. amb (°C)
1	0,5	10,9	6,9	123,0	0,0123	65	0,6558	8,1462	27,0942	20,2
	0,3	14,2	4,6	51,0	0,0051	65	0,6248	10,5696	30,2595	20,6
	0,3	13,9	4,9	22,0	0,0022	63	0,7115	9,4884	29,2621	20,9
	0,3	12,9	5,6	9,0	0,0009	63	0,7424	9,3987	28,9320	21,3
	1,5	11,3	5,9	100,0	0,0100	62	0,8971	8,5357	28,1728	21,6
2	0,3	14,3	4,6	115,0	0,0115	63	0,8352	10,0420	30,1087	20,5
	0,3	13,3	5,4	52,0	0,0052	62	0,6372	8,1070	27,7494	21,1
	0,3	12,9	5,6	24,0	0,0024	61	0,6805	8,8315	28,2944	21,5
	0,3	13,6	5,1	9,0	0,0009	61	1,1136	13,4980	33,5725	21,7
	0,8	11,2	6,5	29,0	0,0029	66	1,1136	9,7842	29,3707	20,7
3	0,4	11,8	6,2	165,0	0,0165	58	0,6187	9,4935	28,5386	21,4
	0,2	14,6	4,6	63,0	0,0063	58	0,6805	8,7408	28,8377	21,3
	0,2	14,2	4,7	17,0	0,0017	59	0,7424	8,8919	28,7560	21,2
	0,4	9,6	7,9	17,0	0,0017	60	0,6805	9,2931	27,9153	21,1
	1,2	11,3	6,2	64,5	0,0065	61	1,1136	9,5623	29,2823	20,9



### 3.3 Medición tomada por el sistema electrónico

Prueba	Torque (V)	RPM	V. aire (V)	T. Adm (°C)	T. Esc (°C)	T. Ace (°C)	Torque (Nm)	Vel ang (r/seg)
1	5,2	3289	1,69140	25	543,0	65	4	344,42327
	5,3	3288	1,78737	24	549,0	77	6	344,31855
	5,4	3292	1,72395	26	554,0	81	8,2	344,73743
	5,5	3294	1,78303	26	586,0	87	9,2	344,94687
	5,5	3293	1,71182	27	635,0	93	10,4	344,84215
2	5,2	3289	1,79202	24	500,2	68	4	344,42327
	5,3	3286	1,76502	32	542,0	74	6	344,10912
	5,4	3293	1,81060	26	555,0	78	7,6	344,84215
	5,4	3287	1,78596	27	568,0	81	8,8	344,21384
	5,5	3283	1,70237	28	591,0	81	10,4	343,79496
3	5,2	3294	1,82417	26	515,0	92	4	344,94687
	5,3	3300	1,74751	28	533,0	92	6	345,57519
	5,4	3295	1,76247	26	549,0	93	7,6	345,05159
	5,4	3283	1,78765	25	576,0	93	8,6	343,79496
	5,5	3306	1,83135	26	590,0	89	10,2	346,20351

### 3.4 Valores calculados

Los siguientes datos fueron hallados con las ecuaciones mencionadas en el marco teórico y se encuentran registrados a continuación:

#### 3.4.1 Diésel

Prueba	m fuel (gr/s)	%Diésel (gr)	%Biodiesel (gr)	Diésel(mol)	Biodiesel (mol)	TOTAL FUEL (mol)	BSFC (g/kWh)
1	0,353333	9,540000	1,060000	0,046455	0,003414	0,049869	923,282680
	0,291066	9,090000	1,010000	0,044264	0,003253	0,047517	507,204147
	0,343284	10,350000	1,150000	0,050400	0,003704	0,054103	437,172967
	0,387097	10,800000	1,200000	0,052591	0,003865	0,056455	439,118837
	0,473856	13,050000	1,450000	0,063547	0,004670	0,068217	475,658688
2	0,450000	12,150000	1,350000	0,059165	0,004348	0,063512	1175,878850
	0,341060	9,270000	1,030000	0,045140	0,003317	0,048458	594,682854
	0,365449	9,900000	1,100000	0,048208	0,003543	0,051751	501,989701
	0,404494	16,200000	1,800000	0,078886	0,005797	0,084683	480,733130
	0,557276	16,200000	1,800000	0,078886	0,005797	0,084683	561,099241
3	0,333333	9,000000	1,000000	0,043826	0,003220	0,047046	869,699270
	0,366667	9,900000	1,100000	0,048208	0,003543	0,051751	636,619857
	0,400000	10,800000	1,200000	0,052591	0,003865	0,056455	549,117034
	0,360656	9,900000	1,100000	0,048208	0,003543	0,051751	439,134394
	0,600000	16,200000	1,800000	0,078886	0,005797	0,084683	611,676996

### 3.4.2 Aire de entrada

Prueba	$\dot{m}$ air (gr/s)	m air (gr)	air (mol)
1	9,91643	297,49277	10,31159
	11,12378	385,99526	13,37923
	10,34366	346,51250	12,01069
	11,07205	343,23367	11,89704
	10,18689	311,71884	10,80469
2	12,22428	366,72828	12,71141
	9,80337	296,06180	10,26199
	10,71502	322,52202	11,17914
	11,07727	492,93850	17,08606
	11,06238	357,31490	12,38512
3	11,55655	346,69664	12,01708
	10,64033	319,20993	11,06434
	10,82423	324,72692	11,25557
	11,12711	339,37694	11,76336
	11,64026	349,20786	12,10412

### 3.4.3 Gas licuado de petróleo

Prueba	$\dot{m}$ GLP (gr/s)	m GLP (gr)	mol GLP
1	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08
	4,8807E-08	1,6936E-06	3,84075E-08
	4,8807E-08	1,63503E-06	3,70793E-08
	4,8807E-08	1,51302E-06	3,43122E-08
	4,8807E-08	1,49349E-06	3,38694E-08
2	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08
	4,8807E-08	1,47397E-06	3,34267E-08
	4,8807E-08	1,46909E-06	3,3316E-08
	4,8807E-08	2,17191E-06	4,92546E-08
	4,8807E-08	1,57647E-06	3,57511E-08
3	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08
	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08
	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08
	4,8807E-08	1,48861E-06	3,37588E-08
	4,8807E-08	1,46421E-06	3,32053E-08

### 3.4.4 Parámetros del desempeño del motor

Teniendo en cuenta que en las ecuaciones de BMEP y  $\eta$  volumétrica se necesita el volumen desplazado o también conocido como cilindraje, el valor usado es de:

$V_d$ (m <sup>3</sup> )
0,000418

Prueba	BP (W)	BMEP (kPa)	m TOTAL (gr)	ṁ TOTAL (gr/s)	AF (gr air/gr fuel+gr GLP)	η térmica	η volumétrica
1	1377,6931	120,2524	308,0928	10,2698	28,0654	0,0886	0,7066
	2065,9113	180,3785	396,0953	11,4148	38,2173	0,1613	0,7928
	2826,8470	246,5173	358,0125	10,6869	30,1315	0,1872	0,7363
	3173,5112	276,5804	355,2337	11,4592	28,6028	0,1863	0,7877
	3586,3584	312,6561	326,2188	10,6607	21,4979	0,1720	0,7250
2	1377,6931	120,2524	380,2283	12,6743	27,1651	0,0696	0,8710
	2064,6547	180,3785	306,3618	10,1444	28,7439	0,1376	0,6992
	2620,8004	228,4795	333,5220	11,0805	29,3202	0,1630	0,7626
	3029,0817	264,5552	510,9385	11,4818	27,3855	0,1702	0,7898
	3575,4675	312,6561	375,3149	11,6197	19,8508	0,1458	0,7897
3	1379,7875	120,2524	356,6966	11,8899	34,6697	0,0941	0,8222
	2073,4512	180,3785	330,2099	11,0070	29,0191	0,1285	0,7556
	2622,3921	228,4795	336,7269	11,2242	27,0606	0,1490	0,7699
	2956,6366	258,5426	350,3769	11,4878	30,8524	0,1863	0,7943
	3531,2758	306,6435	367,2079	12,2403	19,4004	0,1338	0,8251

### 3.4.5 Fracciones molares y másicas

Fracciones molares							
Prueba	YCO2	YCO	YO2	YHC	YH2O	YN2	TOTAL Y*masa molecular
1	0,254667	0,017716	0,402300	0,000454	0,024204	0,300660	33,441544
	0,152018	0,008592	0,469274	0,000169	0,020649	0,349298	32,106330
	0,167452	0,008885	0,475017	0,000075	0,024313	0,324257	32,340870
	0,193558	0,010024	0,445874	0,000031	0,025660	0,324854	32,629503
	0,209422	0,054308	0,401097	0,000355	0,031841	0,302977	32,638016
2	0,152780	0,010628	0,474946	0,000382	0,027739	0,333525	32,067029
	0,194599	0,010811	0,479290	0,000187	0,022963	0,292150	32,803950
	0,197919	0,009896	0,455920	0,000085	0,024051	0,312129	32,754576
	0,151910	0,007744	0,405094	0,000027	0,033170	0,402055	31,725771
	0,221309	0,026217	0,381332	0,000099	0,037915	0,333129	32,692595
3	0,217249	0,014366	0,413474	0,000578	0,021678	0,332654	32,910947
	0,159514	0,007282	0,506283	0,000218	0,023598	0,303105	32,343496
	0,163444	0,007651	0,493810	0,000059	0,025817	0,309219	32,336870
	0,282999	0,014687	0,344972	0,000061	0,024378	0,332902	33,670438
	0,211732	0,039273	0,384191	0,000220	0,038029	0,326554	32,547791

Fracciones másicas						
Prueba	XCO2	XCO	XO2	XHC	XH2O	XN2
1	0,3351447	0,0148386	0,3849435	0,0001767	0,0130387	0,2518578
	0,2083778	0,0074961	0,4677019	0,0000683	0,0115867	0,3047692
	0,2278690	0,0076954	0,4699929	0,0000303	0,0135435	0,2808690
	0,2610636	0,0086045	0,4372554	0,0000124	0,0141672	0,2788969
	0,2823874	0,0466072	0,3932412	0,0001416	0,0175754	0,2600471
2	0,2096783	0,0092835	0,4739353	0,0001551	0,0155838	0,2913639
	0,2610722	0,0092312	0,4675260	0,0000744	0,0126110	0,2494853
	0,2659263	0,0084625	0,4454000	0,0000337	0,0132285	0,2669490
	0,2107275	0,0068374	0,4085800	0,0000110	0,0188351	0,3550090
	0,2979173	0,0224616	0,3732395	0,0000393	0,0208929	0,2854494

3	0,2905122	0,0122271	0,4020147	0,0002287	0,0118664	0,2831509
	0,2170488	0,0063065	0,5008869	0,0000879	0,0131443	0,2625256
	0,2224426	0,0066269	0,4886476	0,0000238	0,0143829	0,2678762
	0,3698987	0,0122182	0,3278455	0,0000235	0,0130435	0,2769706
	0,2862936	0,0337976	0,3777111	0,0000881	0,0210493	0,2810604

### 3.4.6 Masa emisiones de salida y emisiones específicas

Masa emisiones							
Prueba	m CO2 (gr)	m CO (gr)	m O2(gr)	m HC (gr)	m H2O (gr)	m N2(gr)	TOTAL m salida
1	103,25566	4,57166	118,59832	0,05445	4,01712	77,59555	308,09277
	82,53744	2,96917	185,25450	0,02707	4,58943	120,71765	396,09526
	81,57996	2,75505	168,26332	0,01084	4,84875	100,55460	358,01250
	92,73857	3,05660	155,32785	0,00441	5,03267	99,07358	355,23367
	92,12010	15,20415	128,28270	0,04619	5,73344	84,83227	326,21885
2	79,72564	3,52987	180,20360	0,05896	5,92541	110,78481	380,22829
	79,98255	2,82808	143,23211	0,02278	3,86352	76,43276	306,36180
	88,69228	2,82244	148,55071	0,01124	4,41199	89,03336	333,52203
	107,66878	3,49350	208,75927	0,00562	9,62358	181,38776	510,93850
	111,81279	8,43018	140,08234	0,01476	7,84143	107,13340	375,31490
3	103,62473	4,36138	143,39730	0,08158	4,23269	100,99898	356,69664
	71,67167	2,08246	165,39784	0,02904	4,34037	86,68855	330,20993
	74,90242	2,23146	164,54080	0,00801	4,84310	90,20112	336,72692
	129,60397	4,28098	114,86951	0,00825	4,57013	97,04411	350,37694
	105,12926	12,41075	138,69848	0,03235	7,72946	103,20757	367,20786

Emisiones Especificas			
Prueba	BSCO2 (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSHC (g/kWh)
1	8993,7877	398,2016	4,7426
	4144,8836	149,1063	1,3594
	3101,2649	104,7332	0,4119
	3393,6039	111,8509	0,1613
	3021,9119	498,7575	1,5151
2	6944,2727	307,4589	5,1355
	4617,8880	163,2823	1,3154
	4047,5094	128,8030	0,5131
	2875,5523	93,3024	0,1501
	3485,4481	262,7872	0,4600
3	9012,2335	379,3087	7,0949
	4147,9640	120,5215	1,6805
	3427,5159	102,1110	0,3667
	5173,9593	170,9023	0,3294
	3572,5080	421,7427	1,0994

## ANEXO 4. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 2

En las siguientes tablas se registran los datos experimentales tomados durante las pruebas con la mezcla de Diésel-GLP 1, en total se realizaron 3 pruebas por cada medición.

### 4.1 Medición del combustible

Prueba	Potencia (W)	m fuel inicial (gr)	m fuel final (gr)	m total final (gr)	Tiempo (s)
1	600	1816	1806	10	30,7
	1250	1763	1754	9	30
	1850	1710	1700,1	9,9	30,4
	2450	1669	1658	11	30,6
	3100	1615	1600	15	30
2	600	1696	1689	7	30,5
	1250	1627	1619	8	30,2
	1850	1583	1574	9	30,4
	2450	1547	1537	10	30
	3100	1321	1279	42	30
3	600	1156	1147	9	31
	1250	1189	1181	8	30
	1850	1216	1207	9	31
	2450	1253	1244	9	30
	3100	1329	1313	16	30

### 4.2 Medición de los gases de escape

Prueba	CO (%)	O2 (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	HC (%)	HR (%)	H2O(%)	N2(%)	TOTAL (%)	T. amb (°C)
1	0,3	14,5	4,3	78	0,0078	63	0,6187	10,2763	30,0028	21
	0,3	14,3	4,4	45	0,0045	62	0,5568	8,0533	27,5646	21,3
	0,2	14,0	4,8	15	0,0015	62	0,6125	8,9195	28,5235	21,5
	0,1	13,7	5,0	10	0,0010	61	0,6805	9,2818	28,8033	21,7
	1,6	10,8	6,1	111	0,0111	61	0,9280	9,0875	28,5366	21,9
2	0,5	11,1	6,7	251	0,0251	62	0,4331	9,5203	28,2784	21,8
	0,3	13,9	4,8	33	0,0033	62	0,4949	9,6198	29,0780	21,9
	0,2	14,1	4,5	13	0,0013	61	0,5568	8,8545	28,1826	22
	0,2	12,8	5,6	15	0,0015	61	0,6187	8,7380	27,9381	22,2
	1,2	11,3	5,9	79	0,0079	64,5	0,9589	9,5241	28,9159	20,25
3	0,4	11,7	6,3	270	0,0270	61	0,5568	8,8516	27,8754	20,8
	0,4	11,0	6,7	64	0,0064	62	0,4949	8,9678	27,5691	20,6
	0,2	14,0	4,7	22	0,0022	63	0,5568	9,4237	28,8927	20,1
	0,3	13,6	4,5	16	0,0016	65	0,5568	9,0042	27,9526	19,6
	0,8	11,8	5,7	47	0,0047	68	0,9899	9,3370	28,6716	18,6

### 4.3 Medición tomada por el sistema electrónico

Prueba	Torque (V)	RPM	V. aire (V)	T. Adm (°C)	T. Esc (°C)	T. Ace (°C)	Torque (Nm)	Vel. ang (r/seg)
1	5,20	3291	1,88130	25	545	85,00	4,00	344,63271
	5,31	3290	1,68306	24	570	87,60	6,20	344,52799
	5,41	3312	1,75355	27	595	91,20	8,20	346,83183
	5,50	3296	1,78347	26	620	90,80	10,00	345,15631
	5,53	3297	1,78222	27	652	93,20	10,60	345,26103
2	5,19	3284	1,81071	20	558	93,00	3,80	343,89968
	5,27	3283	1,83071	25	597	86,00	5,40	343,79496
	5,38	3289	1,74723	25	605	89,00	7,60	344,42327
	5,46	3291	1,82737	21	614	87,00	9,20	344,63271
	5,53	3295	1,82737	27	616	82,60	10,50	345,05159
3	5,19	3297	1,73054	30	557	89,00	3,80	345,26103
	5,31	3289	1,77009	25	562	88,00	6,20	344,42327
	5,39	3282	1,78550	28	563	82,00	7,80	343,69024
	5,44	3278	1,77377	22	571	80,00	8,80	343,27136
	5,52	3293	1,80789	27	580	72,00	10,40	344,84215

### 4.4 Valores calculados

Los siguientes datos fueron hallados con las ecuaciones mencionadas en el marco teórico y se encuentran registrados a continuación:

#### 4.4.1 Diésel

Prueba	m fuel (gr/s)	%Diésel (gr)	%Biodiesel (gr)	Diésel (mol)	Biodiesel (mol)	TOTAL FUEL (mol)	BSFC (g/kWh)
1	0,325733	9,0	1,0	0,043826	0,003220	0,047046	850,643845
	0,300000	8,1	0,9	0,039443	0,002898	0,042342	505,600729
	0,325658	8,9	1,0	0,043387	0,003188	0,046576	412,222263
	0,359477	9,9	1,1	0,048208	0,003543	0,051751	374,936790
	0,500000	13,5	1,5	0,065739	0,004831	0,070569	491,834693
2	0,229508	6,3	0,7	0,030678	0,002254	0,032932	632,245174
	0,264901	7,2	0,8	0,035061	0,002576	0,037637	513,679749
	0,296053	8,1	0,9	0,039443	0,002898	0,042342	407,160357
	0,333333	9,0	1,0	0,043826	0,003220	0,047046	378,474868
	1,400000	37,8	4,2	0,184068	0,013526	0,197594	1391,096413
3	0,290323	8,1	0,9	0,039443	0,002898	0,042342	796,622009
	0,266667	7,2	0,8	0,035061	0,002576	0,037637	449,559533
	0,290323	8,1	0,9	0,039443	0,002898	0,042342	389,871658
	0,300000	8,1	0,9	0,039443	0,002898	0,042342	357,522730
	0,533333	14,4	1,6	0,070121	0,005153	0,075274	535,362097

#### 4.4.2 Aire de entrada

Prueba	$\dot{m}$ air (gr/s)	m air (gr)	air (mol)
1	12,22428	375,28528	13,00800
	9,80337	294,10113	10,19403
	10,71502	325,73653	11,29056
	11,07727	338,96445	11,74907
	11,06238	331,87142	11,50321
2	11,39915	347,67418	12,05096
	11,63275	351,30898	12,17695
	10,63683	323,35974	11,20818
	10,63683	319,10501	11,06070
	11,59382	347,81472	12,05583
3	10,42763	323,25661	11,20461
	10,91664	327,49918	11,35166
	11,10153	344,14754	11,92872
	10,96096	328,82895	11,39775
	11,36611	340,98338	11,81904

#### 4.4.3 Gas licuado de petróleo

Prueba	$\dot{m}$ GLP (gr/s)	m GLP (gr)	mol GLP
1	9,769E-08	2,999E-06	6,801E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
	9,769E-08	2,970E-06	6,735E-08
	9,769E-08	2,989E-06	6,779E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
2	9,769E-08	2,980E-06	6,757E-08
	9,769E-08	2,950E-06	6,691E-08
	9,769E-08	2,970E-06	6,735E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
3	9,769E-08	3,028E-06	6,868E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
	9,769E-08	3,028E-06	6,868E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08
	9,769E-08	2,931E-06	6,646E-08

#### 4.4.4 Parámetros de desempeño del motor

Teniendo en cuenta que en las ecuaciones de BMEP y  $\eta$  volumétrica se necesita el volumen desplazado o también conocido como cilindraje, el valor usado es de:

$V_d$ (m <sup>3</sup> )
0,000418

Prueba	BP (W)	BMEP (kPa)	m TOTAL (gr)	ṁ TOTAL (gr/s)	AF (gr air/gr fuel+gr GLP)	η térmica	η volumétrica
1	1378,5309	120,2524	385,2853	12,5500	37,5285	0,0962	0,8705
	2136,0736	186,3911	303,1011	10,1034	32,6779	0,1618	0,6983
	2844,0210	246,5173	335,6365	11,0407	32,9027	0,1985	0,7582
	3451,5631	300,6309	349,9645	11,4367	30,8149	0,2182	0,7876
	3659,7669	318,6687	346,8714	11,5624	22,1248	0,1664	0,7863
2	1306,8188	114,2397	354,6742	11,6287	49,6677	0,1294	0,8135
	1856,4928	162,3407	359,3090	11,8976	43,9136	0,1593	0,8304
	2617,6169	228,4795	332,3597	10,9329	35,9288	0,2009	0,7579
	3170,6210	276,5804	329,1050	10,9702	31,9105	0,2162	0,7574
	3623,0417	315,6624	389,8147	12,9938	8,2813	0,0588	0,8246
3	1311,9919	114,2397	332,2566	10,7180	35,9174	0,1027	0,7412
	2135,4243	186,3911	335,4992	11,1833	40,9374	0,1820	0,7778
	2680,7838	234,4921	353,1475	11,3919	38,2386	0,2099	0,7927
	3020,7879	264,5552	337,8289	11,2610	36,5365	0,2288	0,7836
	3586,3584	312,6561	356,9834	11,8994	21,3115	0,1528	0,8089

#### 4.4.5 Fracciones molares y máxicas

Fracciones molares							
Prueba	YCO2	YCO	YO2	YHC	YH2O	YN2	TOTAL Y*masa molecular
1	0,143320	0,009999	0,483289	0,000260	0,020620	0,342512	32,021968
	0,159625	0,009070	0,518782	0,000163	0,020200	0,292161	32,429898
	0,168282	0,006661	0,490823	0,000053	0,021472	0,312708	32,445890
	0,173591	0,004861	0,475640	0,000035	0,023627	0,322247	32,449043
	0,213760	0,056419	0,378461	0,000389	0,032519	0,318452	32,609903
2	0,236930	0,017681	0,392526	0,000888	0,015314	0,336662	33,201244
	0,165073	0,008941	0,478024	0,000113	0,017021	0,330827	32,387140
	0,159673	0,006032	0,500310	0,000046	0,019757	0,314182	32,363242
	0,200443	0,006443	0,458155	0,000054	0,022144	0,312761	32,823416
	0,204040	0,042364	0,390788	0,000273	0,033162	0,329372	32,498891
3	0,226005	0,015785	0,419724	0,000969	0,019974	0,317543	33,087095
	0,243025	0,014509	0,398997	0,000232	0,017952	0,325284	33,308004
	0,162671	0,007268	0,484552	0,000076	0,019271	0,326162	32,352794
	0,160987	0,010375	0,486538	0,000057	0,019919	0,322125	32,327561
	0,198803	0,029297	0,411557	0,000164	0,034524	0,325655	32,485965

Fracciones máxicas						
Prueba	XCO2	XCO	XO2	XHC	XH2O	XN2
1	0,196972	0,008746	0,482939	0,000106	0,011601	0,299636
	0,216622	0,007834	0,511886	0,000066	0,011221	0,252372
	0,228257	0,005750	0,484060	0,000021	0,011922	0,269989
	0,235436	0,004196	0,469041	0,000014	0,013117	0,278197
	0,288486	0,048461	0,371369	0,000155	0,017965	0,273565
2	0,314059	0,014917	0,378309	0,000348	0,008310	0,284057
	0,224311	0,007733	0,472293	0,000046	0,009468	0,286150
	0,217133	0,005221	0,494676	0,000019	0,010998	0,271954
	0,268753	0,005498	0,446645	0,000021	0,012154	0,266928
	0,276308	0,036513	0,384775	0,000109	0,018383	0,283912



3	0,300612	0,013362	0,405919	0,000381	0,010876	0,268850
	0,321107	0,012201	0,383314	0,000091	0,009710	0,273578
	0,221281	0,006293	0,479250	0,000031	0,010731	0,282415
	0,219161	0,008989	0,481590	0,000023	0,011100	0,279137
	0,269323	0,025261	0,405385	0,000066	0,019145	0,280820

#### 4.4.6 Masa emisiones de salida y emisiones específicas

Masa emisiones							
Prueba	m CO2 (gr)	m CO (gr)	m O2 (gr)	m HC (gr)	m H2O (gr)	m N2 (gr)	TOTAL m salida
1	75,890565	3,369836	186,069243	0,040722	4,469552	115,445363	385,285281
	65,658325	2,374353	155,153085	0,019864	3,401138	76,494365	303,101130
	76,611532	1,930077	162,468138	0,007082	4,001591	90,618112	335,636532
	82,394169	1,468327	164,147509	0,004875	4,590540	97,359035	349,964455
	100,067429	16,809586	128,817219	0,053865	6,231588	94,891736	346,871423
2	111,388758	5,290598	134,176603	0,123441	2,947198	100,747580	354,674179
	80,596914	2,778553	169,698980	0,016391	3,401824	102,816321	359,308983
	72,166392	1,735160	164,410236	0,006167	3,655187	90,386604	332,359747
	88,448017	1,809426	146,993219	0,007008	3,999859	87,847484	329,105013
	107,708769	14,233227	149,990845	0,042662	7,165975	110,673244	389,814722
3	99,880430	4,439773	134,869259	0,126626	3,613491	89,327030	332,256609
	107,731058	4,093496	128,601509	0,030441	3,257623	91,785055	335,499181
	78,144941	2,222238	169,245957	0,010820	3,789572	99,734018	353,147546
	74,038980	3,036786	162,694952	0,007787	3,750033	94,300412	337,828950
	96,143878	9,017669	144,715832	0,023451	6,834572	100,247979	356,983381

Emisiones Especificas			
Prueba	BSCO2 (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSHC (g/kWh)
1	6455,5823	286,6530	3,4640
	3688,5429	133,3860	1,1159
	3189,9969	80,3657	0,2949
	2808,4179	50,0481	0,1662
	3281,1082	551,1691	1,7662
2	10060,7106	477,8505	11,1493
	5175,1234	178,4108	1,0525
	3264,8094	78,4987	0,2790
	3347,5342	68,4822	0,2652
	3567,4588	471,4235	1,4130
3	8840,7691	392,9800	11,2081
	6053,9383	230,0337	1,7107
	3385,1653	96,2652	0,4687
	2941,1788	120,6355	0,3093
	3216,9862	301,7323	0,7847

## ANEXO 5. CÁLCULOS PRUEBAS DIESEL-GLP 3

En las siguientes tablas se registran los datos experimentales tomados durante las pruebas con la mezcla de Diésel-GLP 1, en total se realizaron 3 pruebas por cada medición.

### 5.1 Medición del combustible

Prueba	Potencia (W)	m fuel inicial (gr)	m fuel final (gr)	m total final (gr)	Tiempo (s)
1	1250	1533	1526	7	30,1
	1850	1499	1490	9	30,5
	2450	1454	1445,5	8,5	30,89
	3100	1409	1393	16	37,84
2	1250	1508	1501	7	30,2
	1850	1473	1465	8	30,1
	2450	1437	1430	7	30
	3100	1407	1398	9	30,3
3	1250	1654	1646	8	30,4
	1850	1557	1550	7	30,3
	2450	1456	1447	9	30
	3100	1351	1336	15	30,4

### 5.2 Medición de los gases de escape

Prueba	CO (%)	O2 (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	HC (%)	HR (%)	H2O (%)	N2 (%)	TOTAL (%)	T. amb (°C)
1	0,2	13,2	5,3	35,0	0,0035	61	0,4331	8,9605	28,0771	21,8
	0,1	12,8	5,6	12,0	0,0012	61	0,5568	8,9632	28,0612	22
	0,1	12,3	6,0	3,0	0,0003	60	0,5259	9,9351	28,8613	22,2
	0,8	11,0	6,4	44,0	0,0044	60	0,9899	10,0643	29,2986	22,3
2	0,4	9,9	7,5	132,0	0,0132	62	0,4331	8,8301	26,9864	21,7
	0,2	11,0	6,6	37,0	0,0037	61	0,4949	8,6412	26,9499	21,9
	0,2	13,3	5,0	10,0	0,001	60	0,4331	8,7228	27,6069	22,5
	0,1	13,5	5,2	9,0	0,0009	60	0,5568	9,5688	28,9165	22,2
3	0,3	9,8	7,8	8,0	0,0008	32	0,4949	8,9696	27,3553	28,3
	0,3	10,0	7,6	3,0	0,0003	31	0,4331	8,6221	26,9155	28,6
	0,2	9,0	8,3	2,0	0,0002	30	0,5568	8,4609	26,5379	29
	2,9	7,1	4,0	236,0	0,0236	29	0,9280	8,7337	23,6253	29,3

### 5.3 Medición tomada por el sistema electrónico

Prueba	Torque (V)	RPM	V. aire (V)	T. Adm (°C)	T. Esc (°C)	T. Ace (°C)	Torque (Nm)	Vel ang (r/seg)
1	5,32	3284	1,76636	24	580	94,1	6,4	343,899676
	5,42	3286	1,75495	23	601	93,1	8,4	344,109115
	5,48	3320	1,84041	25	612	97	9,6	347,669587
	5,53	3294	1,67648	24,8	634	99,9	10,6	344,946873
2	5,29	3278	1,75054	24	577	90	5,8	343,271357
	5,38	3278	1,73501	27	615	94	7,6	343,271357
	5,44	3279	1,74574	27	618	92	8,8	343,376077
	5,52	3280	1,82214	27	624	90	10,4	343,480797
3	5,33	3303	1,75845	26	598	85	6,6	345,889351
	5,42	3277	1,72773	31	584	87	8,4	343,166638
	5,5	3307	1,72052	29	591	89	10	346,308230
	5,55	3302	1,73562	27	595	95	11	345,784631

### 5.4 Valores calculados

Los siguientes datos fueron hallados con las ecuaciones mencionadas en el marco teórico y se encuentran registrados a continuación:

#### 5.4.1 Diésel

Prueba	m fuel (gr/s)	%Diésel (gr)	%Biodiesel (gr)	Diésel (mol)	Biodiesel (mol)	TOTAL FUEL (mol)	BSFC (g/kWh)
1	0,2325581	6,3	0,7	0,0306780	0,0022543	0,0329323	380,3842956
	0,2950820	8,1	0,9	0,0394431	0,0028984	0,0423415	367,5106454
	0,2751700	7,65	0,85	0,0372518	0,0027374	0,0399892	296,8013109
	0,4228330	14,4	1,6	0,0701211	0,0051527	0,0752738	416,3067266
2	0,2317881	6,3	0,7	0,0306780	0,0022543	0,0329323	419,1102783
	0,2657807	7,2	0,8	0,0350606	0,0025764	0,0376369	366,7541799
	0,2333333	6,3	0,7	0,0306780	0,0022543	0,0329323	277,9885140
	0,2970297	8,1	0,9	0,0394431	0,0028984	0,0423415	299,3414066
3	0,2631579	7,2	0,8	0,0350606	0,0025764	0,0376369	414,9903699
	0,2310231	6,3	0,7	0,0306780	0,0022543	0,0329323	288,5186174
	0,3000000	8,1	0,9	0,0394431	0,0028984	0,0423415	311,8610629
	0,4934211	13,5	1,5	0,0657385	0,0048307	0,0705692	467,0054331

#### 5.4.2 Aire de entrada

Prueba	$\dot{m}$ air (gr/s)	m air (gr)	air (mol)
1	10,87150	327,23230	11,34241
	10,73217	327,33125	11,34584
	11,74570	362,82468	12,57610
	9,71310	367,54386	12,73967
2	10,67782	322,47009	11,17734
	10,48414	315,57256	10,93826
	10,61840	318,55190	11,04153
	11,53286	349,44554	12,11236
3	10,77510	327,56307	11,35387
	10,39193	314,87561	10,91411
	10,29957	308,98700	10,71000
	10,49180	318,95068	11,05535

#### 5.4.3 Gas licuado de petróleo

Prueba	$\dot{m}$ GLP (gr/s)	m GLP (gr)	mol GLP
1	1,466E-07	4,411E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,470E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,527E-06	3,324E-09
	1,466E-07	5,546E-06	3,324E-09
2	1,466E-07	4,426E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,411E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,397E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,441E-06	3,324E-09
3	1,466E-07	4,455E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,441E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,397E-06	3,324E-09
	1,466E-07	4,455E-06	3,324E-09

#### 5.4.4 Parámetros de desempeño del motor

Teniendo en cuenta que en las ecuaciones de BMEP y  $\eta$  volumétrica se necesita el volumen desplazado o también conocido como cilindraje, el valor usado es de:

$V_d$ (m <sup>3</sup> )
0,000418

Prueba	BP (W)	BMEP (kPa)	m TOTAL (gr)	ṁ TOTAL (gr/s)	AF (gr air/gr fuel+gr GLP)	η térmica	η volumétrica
1	2200,9579	192,4038	334,2323	11,1041	46,7474	0,2151	0,7758
	2890,5166	252,5299	336,3313	11,0273	36,3701	0,2226	0,7654
	3337,6280	288,6056	371,3247	12,0209	42,6852	0,2757	0,8291
	3656,4369	318,6687	383,5439	10,1359	22,9715	0,1965	0,6910
2	1990,9739	174,3659	329,4701	10,9096	46,0671	0,1952	0,7634
	2608,8623	228,4795	323,5726	10,7499	39,4465	0,2231	0,7495
	3021,7095	264,5552	325,5519	10,8517	45,5074	0,2943	0,7589
	3572,2003	312,6561	358,4455	11,8299	38,8273	0,2733	0,8240
3	2282,8697	198,4164	335,5631	11,0383	40,9454	0,1972	0,7645
	2882,5998	252,5299	321,8756	10,6230	44,9822	0,2836	0,7432
	3463,0823	300,6309	317,9870	10,5996	34,3319	0,2624	0,7299
	3803,6309	330,6940	333,9507	10,9852	21,2634	0,1752	0,7446

### 5.4.5 Fracciones molares y másicas

Fracciones molares							
Prueba	YCO2	YCO	YO2	YHC	YH2O	YN2	TOTAL Y*masa molecular
1	0,188766	0,006411	0,470135	0,000125	0,015424	0,319140	32,750496
	0,199564	0,004989	0,456146	0,000043	0,019842	0,319417	32,824525
	0,207891	0,003465	0,426177	0,000010	0,018220	0,344237	32,854994
	0,218441	0,028670	0,375445	0,000150	0,033785	0,343509	32,663761
2	0,277918	0,013340	0,364999	0,000489	0,016047	0,327206	33,745853
	0,244899	0,007792	0,408165	0,000137	0,018365	0,320641	33,371840
	0,181114	0,005433	0,481764	0,000036	0,015687	0,315965	32,673148
	0,179828	0,003112	0,466862	0,000031	0,019255	0,330911	32,557594
3	0,285137	0,010601	0,358249	0,000029	0,018093	0,327891	33,820878
	0,282365	0,011146	0,370047	0,000011	0,016090	0,320341	33,843856
	0,312760	0,007913	0,339515	0,000008	0,020981	0,318823	34,159538
	0,169310	0,121057	0,299679	0,000999	0,039279	0,369677	31,507940

Fracciones másicas						
Prueba	XCO2	XCO	XO2	XHC	XH2O	XN2
1	0,253660	0,005483	0,459344	0,000050	0,008484	0,272979
	0,267565	0,004257	0,444671	0,000017	0,010890	0,272599
	0,278471	0,002954	0,415070	0,000004	0,009991	0,293509
	0,294316	0,024586	0,367801	0,000060	0,018634	0,294604
2	0,362446	0,011073	0,346103	0,000189	0,008567	0,271623
	0,322964	0,006540	0,391372	0,000054	0,009914	0,269156
	0,243954	0,004658	0,471821	0,000014	0,008649	0,270903
	0,243082	0,002678	0,458849	0,000012	0,010655	0,284724
3	0,371035	0,008780	0,338948	0,000011	0,009637	0,271588
	0,367179	0,009225	0,349873	0,000004	0,008565	0,265154
	0,402945	0,006489	0,318039	0,000003	0,011065	0,261459
	0,236488	0,107618	0,304347	0,000413	0,022459	0,328676

#### 5.4.6 Masa emisiones de salida y emisiones específicas

Masa emisiones							
Prueba	m CO2 (gr)	m CO (gr)	m O2 (gr)	m HC (gr)	m H2O (gr)	m N2 (gr)	TOTAL m salida
1	84,781512	1,832593	153,527606	0,016562	2,835749	91,238279	334,232301
	89,990556	1,431875	149,556790	0,005704	3,662654	91,683675	336,331255
	103,403340	1,096861	154,125921	0,001529	3,709768	108,987270	371,324688
	112,882985	9,429660	141,067982	0,022957	7,146822	112,993463	383,543868
2	119,415024	3,648114	114,030543	0,062171	2,822541	89,491705	329,470099
	104,502215	2,116260	126,637259	0,017330	3,207864	87,091630	323,572560
	79,419752	1,516415	153,602195	0,004699	2,815795	88,193050	325,551906
	87,131590	0,959805	164,472511	0,004461	3,819084	102,058088	358,445540
3	124,505651	2,946190	113,738578	0,003777	3,233917	91,134965	335,563077
	118,185921	2,969215	112,615650	0,001380	2,756733	85,346714	321,875613
	128,131391	2,063312	101,132210	0,000913	3,518556	83,140627	317,987008
	78,975273	35,938951	101,636958	0,137836	7,500096	109,761569	333,950684

Emisiones Especificas			
Prueba	BSCO2 (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSHC (g/kWh)
1	4607,0765	99,5842	0,9000
	3674,7190	58,4699	0,2329
	3610,6153	38,2999	0,0534
	2937,1206	245,3518	0,5973
2	7149,7189	218,4230	3,7224
	4790,8254	97,0184	0,7945
	3153,9664	60,2208	0,1866
	2898,0089	31,9233	0,1484
3	6458,5772	152,8300	0,1960
	4871,2596	122,3819	0,0569
	4439,9080	71,4963	0,0316
	2458,7914	1118,9120	4,2913