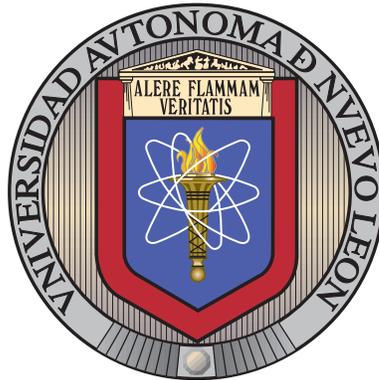


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y ANÁLISIS  
DE EMISIONES DE MEZCLAS  
DIÉSEL-BIODIÉSEL-ACEITE LIGERO EN MOTORES  
DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

POR

VANESSA MANRIQUE GUIO

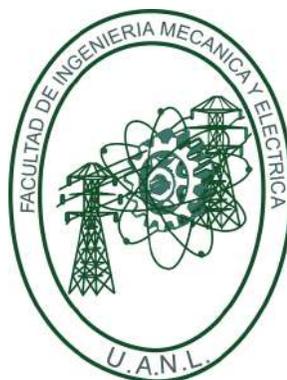
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y ANÁLISIS  
DE EMISIONES DE MEZCLAS  
DIÉSEL-BIODIÉSEL-ACEITE LIGERO EN MOTORES  
DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

POR

VANESSA MANRIQUE GUIO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2019

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Subdirección de Estudios de Posgrado**

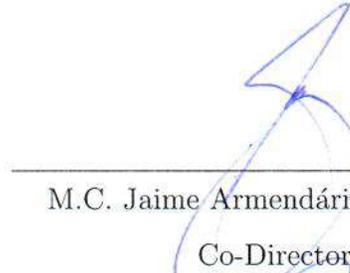
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Caracterización fisicoquímica y análisis de emisiones de mezclas diésel-biodiésel-aceite ligero en motores de encendido por compresión», realizada por la alumna Vanessa Manrique Guio, con número de matrícula 1940819, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



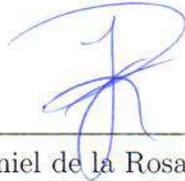
Dr. Simón Martínez Martínez

Director



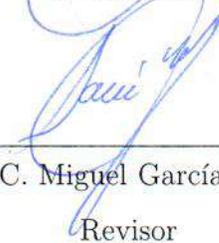
M.C. Jaime Armendáriz Velázquez

Co-Director



Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo

Revisor



M.C. Miguel García Yera

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, diciembre 2019

*“Dile a tu corazón que el miedo  
de sufrir es peor que el miedo en  
sí mismo. Y ningún corazón ha sufrido  
al ir en búsqueda de su sueños”*

***Paulo Coelho***

# AGRADECIMIENTOS

---

A Dios y a la Morenita por darme la sabiduría necesaria para llegar a la meta y no desistir.

A mis padres Reinaldo y Marisol, quienes estuvieron ahí siempre para su hija, desde el momento en que decidió emprender un viaje buscando cumplir un sueño, hasta hoy que con orgullo les puedo decir lo logré. Gracias por nunca dejarme sola a pesar de estar a unas cuantas millas de distancia, por darme ánimo y por siempre recordarme que era su orgullo y que cada vez que cayera debía levantarme porque todo era posible para la guerrera que formaron. Churros de mi corazón, mil gracias por hacer hasta lo imposible por no cortarme las alas, son mi gran orgullo y fueron mi inspiración a diario para no desfallecer y llegar hasta el final.

A mi otra mitad, a mi hermano Carlos Andrés, quien desde el primer momento me dio todo su apoyo para iniciar, quien siempre estuvo ahí para darme una voz de aliento, recordarme que sí podía y que sin duda con el esfuerzo que hacíamos por cumplir nuestros sueños, llegaríamos lejos, siempre serás mi orgullo, te amo hermano.

A ti Cristian Rangel, mi compañero de vida y el dueño de mi corazón, gracias por estar ahí a mi lado apoyándome en esta etapa de mi vida, por estar ahí cuando sentía que ya no podía más, por hacer de esos días grises, días llenos de color, por ayudarme a terminar mis estudios y estar tan pendiente de mí. Siempre recordaré que muchas veces caí y me diste la mano para seguir adelante para poder llegar a la cima. Nos llevamos de México miles de historias, momentos y los más bonitos recuerdos juntos.

A la familia Manrique Acosta y a la familia Guio Pinzón, a mis abuelos, a mis tías, tíos, a mis primos, por todos sus buenos deseos al momento de partir, por ese aliento que me daban desde mi país y por creer en mí. Gracias tía Doly y tía Marina por todo su apoyo.

A mis amigos de Colombia, a Sebas y a Vivi, gracias por tanto, aunque estábamos tan lejos siempre me recordaron lo importante que era llegar a la meta y no perderme en el camino, por sus llamadas, sus palabras y por siempre recordarme lo importante que era para ellos, los adoro. A Pochita, Dani, Clara y Nata gracias por su apoyo y palabras.

A mis compañeros y amigos del posgrado, a mi gran amigo Alán siempre fuimos unos guerreros y llegamos como siempre no lo propusimos al final, me llevó un gran amigo en el corazón. A Rosshy una vez más agradeciéndole por tanto, además de ser mi amiga de muchos años, la vida la puso en mi camino para levantarme cada vez que caía, para verme volar así como ella y para acompañarme. A Niba, Yona, Fong, Checo, Mairita, Critian, Damian, Ulises, Fer, Nory, Briz, Mario, Jorge, Odlan, Juan Carlos, Diego, Martha y Mafe, por su compañerismo y amistad.

A mi director de tesis Dr. Simón Martínez Martínez por recibirme como su estudiante y por su gran ayuda. Al M.C. Jaime Armendáriz por todo el conocimiento compartido, por su apoyo y colaboración. A mis profesores Dr. Daniel, Dr. Fausto, M.C. Cedillo, Dr. Santos, Dr. Arturo, Dr. Héctor, M.C. Miguel y Dr. Oscar. A Fercho, gracias por enseñarme tanto, por ayudarme cuando más lo necesite, aprendí demasiado a su lado Maestro. A los estudiantes de servicio social Junio-Noviembre 2019, gracias por su ayuda y su amistad, han sido la mejor generación.

Agradecida inmensamente con México, por brindarme la oportunidad de seguir con mis estudios, por recibirme y ser una segunda casa donde aprendí de su hermosa cultura. A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la FIME por acogerme y permitirme crecer profesionalmente y finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca número 895848.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.2.1. Biodiésel a partir de aceites vegetales y animales . . . . .	4
1.2.2. Biodiésel a partir de neumáticos y aceites lubricantes residuales	7
1.2.3. Uso de combustibles alternativos en un motor de encendido por compresión (rendimiento y emisiones contaminantes) . . .	9
1.3. Hipótesis . . . . .	13
1.4. Objetivos . . . . .	13
1.4.1. Objetivo general . . . . .	13
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	14
<b>2. Marco teórico</b>	<b>15</b>

---

2.1. Motores de combustión interna alternativos . . . . .	16
2.1.1. Motor de encendido por compresión . . . . .	17
2.2. Combustibles . . . . .	20
2.2.1. Diésel . . . . .	23
2.2.2. Aceite ligero o pale oil . . . . .	23
2.2.3. Biocombustibles . . . . .	23
2.3. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles . . . . .	29
2.3.1. Densidad . . . . .	29
2.3.2. Viscosidad . . . . .	30
2.3.3. Lubricidad . . . . .	31
2.3.4. Inflamabilidad . . . . .	31
2.3.5. Volatilidad . . . . .	32
2.3.6. Propiedades de flujo en frío . . . . .	33
2.3.7. Estabilidad . . . . .	34
2.3.8. Impurezas . . . . .	34
2.4. Parámetros termoquímicos de los combustibles . . . . .	35
2.4.1. Poder calorífico . . . . .	35
2.4.2. Dosado estequiométrico . . . . .	36
2.4.3. Temperatura adiabática de llama . . . . .	36
2.5. Emisiones contaminantes de un motor diésel . . . . .	37

---

<b>3. Metodología</b>	<b>39</b>
3.1. Metodología general . . . . .	40
3.2. Herramientas experimentales . . . . .	41
3.2.1. Método de obtención de gravedad específica . . . . .	41
3.2.2. Método de destilación a presión atmosférica . . . . .	42
3.2.3. Método para la determinación del poder calorífico . . . . .	46
3.2.4. Instalación experimental del motor diésel . . . . .	50
3.3. Correlaciones empíricas para el cálculo de densidad, índice de cetano y viscosidad cinemática . . . . .	52
3.3.1. Densidad . . . . .	53
3.3.2. Viscosidad cinemática . . . . .	53
3.3.3. Índice de cetano . . . . .	55
3.4. Caracterización fisicoquímica . . . . .	56
3.4.1. Obtención de la gravedad específica . . . . .	56
3.4.2. Obtención de las curvas de destilación . . . . .	56
3.4.3. Obtención del poder calorífico . . . . .	57
3.4.4. Obtención empírica de la densidad, la viscosidad cinemática y el índice de cetano . . . . .	57
3.5. Definición de mezclas binarias y ternarias . . . . .	58
3.6. Medición de emisiones contaminantes . . . . .	60
3.6.1. Puesta a punto de la instalación experimental . . . . .	60

---

3.6.2. Protocolo de experimentación para la medición de emisiones contaminantes . . . . .	62
<b>4. Resultados</b>	<b>70</b>
4.1. Caracterización fisicoquímica de mezclas binarias y ternarias . . . . .	71
4.2. Emisiones contaminantes de mezclas binarias y ternarias . . . . .	85
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>101</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	102
5.1.1. Caracterización fisicoquímica de las mezclas . . . . .	102
5.1.2. Emisiones contaminantes de las mezclas . . . . .	103
5.2. Trabajos futuros . . . . .	105
<b>Datos destilaciones ASTM D86-04 combustibles</b>	<b>114</b>
<b>Propiedades fisicoquímicas de las mezclas</b>	<b>132</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Fases de un motor de 4 tiempos . . . . .	17
2.2. Clasificación de los combustibles utilizados en los MCIA. . . . .	20
2.3. Columna de destilación del petróleo y temperaturas de ebullición de los productos. . . . .	22
2.4. Reacción de transesterificación con metanol . . . . .	24
2.5. Etapas de reacción de transesterificación . . . . .	27
2.6. Principales reacciones secundarias en el proceso de transesterificación	28
2.7. Curvas de destilación de combustibles comunes . . . . .	33
3.1. Esquema de la metodología general de la investigación . . . . .	40
3.2. Lectura del hidrómetro . . . . .	42
3.3. Equipo de destilación a nivel laboratorio a presión atmosférica. . . . .	43
3.4. Componentes principales que conforman el calorímetro . . . . .	47
3.5. Diagrama de la instalación experimental del motor diésel. . . . .	50
3.6. Motor diésel Cummins de 6 cilindros, modelo 6BTA de 5.9 L . . . . .	51
3.7. Analizador de gases combinado MET 6.3 . . . . .	52

---

3.8. Curvas de destilación del diésel y del biodiésel. . . . .	58
3.9. Dibujo CAD de la adaptación al escape del motor. . . . .	61
3.10. Banco de pruebas motor diésel para la medición de emisiones conta- minantes. . . . .	62
3.11. Interfaz en tiempo real del software Maha Emission Viewer. . . . .	63
3.12. Metodología experimental de ensayos. . . . .	64
3.13. Control del régimen de giro. . . . .	65
3.14. Línea de tiempo de ensayos. . . . .	66
3.15. Interfaz Software Maha Emission. . . . .	67
3.16. Interfaz Software Maha Emission Viewer. . . . .	68
3.17. Pestaña de selección de variable a medir en el software Maha Emission Viewer. . . . .	68
4.1. Curva de destilación de las mezclas binarias diésel-biodiésel. . . . .	72
4.2. Curva de destilación de las mezclas binarias diésel-aceite ligero. . . . .	72
4.3. Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 5%. . . . .	73
4.4. Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 10%. . . . .	74
4.5. Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 20%. . . . .	74

4.6. Densidad @ 15°C de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	75
4.7. Densidad @ 15°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	76
4.8. Viscosidad @ 40°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	78
4.9. Viscosidad @ 40°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	79
4.10. Índice de Cetano de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	80
4.11. Índice de Cetano de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	81
4.12. Poder calorífico de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	83
4.13. Poder calorífico de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	84

---

4.14. CO de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	86
4.15. CO de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	88
4.16. CO <sub>2</sub> de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	89
4.17. CO <sub>2</sub> de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	91
4.18. HC de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	92
4.19. HC de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	93
4.20. NO <sub>x</sub> de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	95
4.21. NO <sub>x</sub> de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	96
4.22. PM de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	98
4.23. PM de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia. . . . .	99

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Especificaciones técnicas del biodiésel (Unión Europea, EN14214). . . . .	25
2.2. Densidad y viscosidad de algunos combustibles líquidos. . . . .	30
2.3. Poder calorífico superior e inferior de algunos combustibles. . . . .	36
3.1. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles puros. . . . .	59
3.2. Relación de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero. . . . .	59
3.3. Relación de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero. . . . .	60
3.4. Condiciones de operación para la experimentación . . . . .	63
1. Datos destilación D100 . . . . .	115
2. Datos destilación B100 . . . . .	116
3. Datos de destilación D95B5 . . . . .	117
4. Datos de destilación D90B10 . . . . .	118
5. Datos de destilación D80B20 . . . . .	119
6. Datos de destilación D95A5 . . . . .	120
7. Datos de destilación D90A10 . . . . .	121

---

8.	Datos de destilación D80A20 . . . . .	122
9.	Datos de destilación D90B5A5 . . . . .	123
10.	Datos de destilación D85B5A10 . . . . .	124
11.	Datos de destilación D75B5A20 . . . . .	125
12.	Datos de destilación D85B10A5 . . . . .	126
13.	Datos de destilación D80B10A10 . . . . .	127
14.	Datos de destilación D70B10A20 . . . . .	128
15.	Datos de destilación D75B20A5 . . . . .	129
16.	Datos de destilación D70B20A10 . . . . .	130
17.	Datos de destilación D60B20A20 . . . . .	131
18.	Propiedades fisicoquímicas de las mezclas binarias. . . . .	133
19.	Propiedades fisicoquímicas de las mezclas ternarias. . . . .	133

# RESUMEN

---

La creciente demanda de los combustibles fósiles, las afectaciones que causa su uso al medio ambiente y el agotamiento de las reservas de petróleo, han llevado a investigadores a la búsqueda de combustibles alternativos que ayuden a suplir la demanda y que contribuyan al cuidado medioambiental. La producción de biodiésel como combustible alternativo, y su uso como mezcla, además de otro tipo de aditivos son una alternativa a dicha problemática.

En el presente trabajo de investigación se caracterizan fisicoquímicamente mezclas aditivas con diésel, biodiésel de aceite usado de cocina y aceite ligero y se realiza un análisis de las emisiones contaminantes al utilizarlo en un motor de encendido por compresión. La caracterización fisicoquímica se realiza por medio de la medición experimental de la curva de destilación, la gravedad específica y el poder calorífico y mediante el uso de correlaciones empíricas el cálculo de la densidad, la viscosidad cinemática y el índice de cetano.

La medición de las emisiones contaminantes se realiza por medio de un analizador de emisiones combinado MAHA MET 6.3, el cual se adapta a un sistema de válvulas que se acopla a la instalación experimental. Las propiedades de cada mezcla con las emisiones contaminantes se compara con el diésel de referencia. Encontrando que cada una de las propiedades tiene una mejora en comparación con el diésel, reduciendo la mayoría de emisiones, aunque teniendo un alto aumento en el material particulado (PM) para todas las mezclas y un pequeño crecimiento de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en el uso de mezclas binarias con biodiésel.

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo se presenta la motivación que condujo al desarrollo del presente estudio, mostrando los antecedentes e investigaciones o trabajos ya desarrollados para el área de conocimiento. Por último, se expone el planteamiento general de la tesis, que contiene la hipótesis a validar, el objetivo general y los objetivos específicos planteados en esta investigación.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

Los recursos naturales como el petróleo, el gas natural y el carbón, tienen una amplia aplicación en el campo de la ciencia y la tecnología, estos recursos y sus derivados se usan frecuentemente en centrales eléctricas, calderas y algunos motores automotrices, con el fin de satisfacer las necesidades de los seres humanos en el mundo [1]. Por otra parte, el rápido aumento de la población humana, ha generado un alza en la demanda energética, que se espera que para el año 2030, sea superior en un 50 % a la demanda actual [2]. Lo anterior, ha llevado a un agotamiento más rápido de estos recursos no renovables ya que son limitados, tomando así gran importancia el estudio de energías renovables, que de una u otra manera busquen garantizar una seguridad energética.

Los recursos energéticos provenientes del petróleo, gas natural y carbón no son sostenibles para cubrir la demanda energética, esto debido a que los yacimientos descubiertos son cada vez menos y las restricciones medioambientales para su exploración y explotación, junto con los problemas geopolíticos, conllevan a que las reservas probadas posibles de petróleo y gas sean más escasas y la explotación de carbón más restrictiva. Adicional a lo anterior, se deben sumar los problemas medio ambientales que son resultado de la quema de los combustibles fósiles, como el aumento del nivel de dióxido de carbono a la atmósfera, lluvia ácida, cambio en las condiciones climáticas, problemas en los sistemas respiratorio y nervioso tanto en personas, como en animales [3].

Una vez analizada la problemática en la cual se encuentra el mundo, surgió la necesidad de buscar fuentes de energía alternativas, que además de abastecer la demanda energética, ayuden a mitigar los problemas causados al medio ambiente, llevando a los científicos a explorar otros recursos dentro de los que se encuentran la energía solar, eólica, geotérmica, nuclear, hidráulica, térmica, mareomotriz y la biomasa, que tienen el potencial de suplir la alta demanda energética.

La creciente industrialización, motorización del mundo y los cambios climáticos, llevaron a la búsqueda de combustibles alternativos, que puedan producirse a través de materias primas disponibles en cada país. El parque automotriz en el mundo es impulsado por gasolina y diésel, causantes de daño al medio ambiente por sus emisiones contaminantes, es por esto que los bioenergéticos como la biomasa, biogás, alcoholes primarios, aceites vegetales, aceites animales, biodiésel, etc. han sido objeto de estudio. Aunque los combustibles anteriormente mencionados son parte de la solución al problema siendo respetables con el medio ambiente, se debe evaluar en cada uno de ellos las ventajas y desventajas en la aplicación que se vaya a tener. Es importante resaltar que algunos de los combustibles mencionados anteriormente, se pueden usar directamente, mientras que otros deben tener un tratamiento o una formulación, para que sus propiedades sean semejantes a las del combustible convencional que va a sustituir [4].

Los biocombustibles considerados principalmente a nivel mundial son el biodiésel y el bioetanol, los cuales buscan sustituir, debido a la semejanza en sus propiedades, al diésel y la gasolina, respectivamente. Hoy en día el biodiésel ha tomado importancia al ser un combustible limpio, que no contamina como el diésel convencional y además de esto no es tóxico, el cual se puede usar como mezcla con diésel mejorando la eficiencia mecánica de los motores al tener altas propiedades de lubricación, una mayor eficiencia térmica, como resultado de una alta relación de compresión, un gasto menor de combustible, reducción en las emisiones de dióxido de azufre  $SO_2$  y aumento de la seguridad de operación del motor debido a su alto punto de inflamación [1].

La acumulación masiva de desechos de neumáticos, producto del número de vehículos que hay en todo el mundo, hace dirigir la mirada hacia otro problema medio ambiental, la eliminación incontrolada y la no biodegradabilidad de neumáticos, lo que conlleva a la necesidad de una acción cuidadosa con respecto al reciclaje de neumáticos usados con el fin de resolver este problema [5].

Estudios de residuos sólidos municipales, residuos industriales, residuos agrícolas y biomasa, han sido otro eje principal de investigación en la búsqueda de fuentes energéticas de bajo costo. La refinación de desechos envuelve las operaciones termoquímicas destinadas a la producción de combustibles, materiales y químicos a partir de desechos como neumáticos, plásticos, lodos, entre otros desechos que representan una fuente potencial para la producción de combustibles por sus características químicas, composición y su riqueza de carbono e hidrógeno [6]. Finalmente, el término de su vida útil consiste en un alto desperdicio de calorías y, por lo tanto, pueden usarse en plantas dedicadas a la obtención de combustibles o como materia prima para plantas de conversión termoquímica [7].

## 1.2 ANTECEDENTES

En las constantes investigaciones que se han hecho en la búsqueda de nuevos combustibles alternativos, en cuanto a la sustitución del diésel se han encontrado diferentes materias primas para la producción de biodiésel, no solo provenientes de materias primas como los aceites vegetales y animales, sino también de desechos con características similares [8].

### 1.2.1 BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES Y ANIMALES

Desde antes de los años 70, cuando se dio la crisis energética ya eran investigados los aceites vegetales y animales como combustibles, pero a principios de los 80 toman nuevamente interés y es así como para esa época Rudolf Diesel (1858-1913), inventa un motor, donde su fuente de alimentación eran los biocombustibles. En el año 1893, Diesel patenta un nuevo modelo de motor de combustión interna que funcionaba con aceite de maní, dando la apertura a nuevos y alternativos combustibles [9]. Ya para el año de 1920 hasta aproximadamente el final de la Segunda Guerra

Mundial, se encuentran numerosos informes en la literatura sobre el uso de aceites vegetales en motores diésel.

El biodiésel se obtiene comúnmente a partir de la transesterificación, los aceites vegetales o aceites animales están compuestos principalmente por triacilglicerol con alcoholes monohídricos, generalmente metanol, para obtener los correspondientes ésteres monoalquílicos, así el perfil de ácidos grasos del biodiésel corresponde al del aceite o grasa de origen a partir del cual se produce. Para la producción del biodiésel se usa generalmente metanol al ser el alcohol menos costoso [10]. El biodiésel a menudo se conoce como los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) de un aceite vegetal o grasa animal u otro material que contiene triacilglicerol. La cadena de ácido graso y la funcionalidad de alcohol, contribuyen a las propiedades generales de un éster graso [11].

La eficiencia de conversión del biodiésel a través de la transesterificación depende de la naturaleza de la materia prima, la cantidad y el tipo de alcohol, el catalizador, la temperatura de operación y el tiempo de reacción [3]. Según Geetesh, et al. [12] los parámetros para producir un biodiésel de calidad deben ser: una proporción molar de 1:6 con hidróxido de potasio (KOH) como catalizador, mezclarse a una velocidad de 700 revoluciones por minuto (rpm) durante una hora a una temperatura de 65° C. Las propiedades del combustible como el punto de inflamabilidad, el poder calorífico, la viscosidad, la densidad y el índice de cetano de dicho combustible producido son muy similares al diésel.

Deepak, et al. [13] en su experimentación al inyectar mezclas diésel-biodiésel, e implementando recuperación de gases de escape (EGR) en un motor de encendido por compresión, obtuvieron que al aplicar EGR a un motor diésel, se reduce los  $\text{NO}_x$  pero aumenta la opacidad del humo. Este es un intercambio bien conocido entre  $\text{NO}_x$  y material particulado (PM). Por otro lado, al utilizar mezclas diésel-biodiésel, el humo de opacidad se reduce pero los  $\text{NO}_x$  se incrementan. En la experimentación utilizaron un motor diésel de inyección directa de dos cilindros, refrigerado por aire

y de velocidad constante. Las pruebas se hicieron a 1500 rpm, a diferentes tasas de EGR y porcentajes de mezcla [13].

Dentro del estado del arte se encuentra contemplado por varios autores que la utilización de mezclas de aceite por encima del 20 %, las cuales se denotan con una letra B, seguido del número de porcentaje de mezcla, que para el caso sería una mezcla B20, causa problemas de mantenimiento de los equipos, e incluso llegar a dañar el motor. De igual forma aclaran que la coquización es un problema potencialmente grave con el uso de biodiésel vegetal no modificado, pero que este al ser procesado y desgomado, en mezcla con diésel se puede usar en los motores de encendido por compresión durante más tiempo. En cuanto al rendimiento en el motor, las propiedades lubricantes del biodiésel ayudan a aumentar la vida útil del motor y las emisiones de  $\text{NO}_x$  y HC disminuyen, los  $\text{SO}_x$  se reducen a cero y la cantidad de  $\text{CO}_2$  se mantiene [3, 14–17].

Esta demostrado que al usar biodiésel en un motor tipo relación de compresión variable (VCR), este ofrece el potencial de aumentar la eficiencia de combustión y reduce el retardo de encendido bajo cargas variables y proporciona relaciones de compresión más altas, reduce las emisiones de HC, CO,  $\text{CO}_2$  Y  $\text{NO}_x$ , además de reducir el consumo de energía hasta un 30 % en comparación con el motor diésel de compresión constante [1].

Actualmente el estudio de microalgas ha tenido auge por el potencial para mantener el desarrollo de las actividades humanas y el abastecimiento alimenticio en sincronización con el medio ambiente. Las microalgas son las plantas de más rápido crecimiento y pueden servir como una fuente de energía sostenible para la producción de biodiésel y varios otros biocombustibles mediante la conversión de la luz solar en energía química. Los biocombustibles producidos a partir de microalgas son renovables, no tóxicos, biodegradables y respetuosos con el medio ambiente. Las microalgas se pueden cultivar en sistemas de estanques abiertos o fotobiorreactores cerrados [18].

## 1.2.2 BIODIÉSEL A PARTIR DE NEUMÁTICOS Y ACEITES LUBRICANTES RESIDUALES

La pirólisis ha tenido acogida como un proceso termoquímico atractivo para abordar el problema de la eliminación de los neumáticos residuales, al tiempo que permite recuperar energía por medio de la separación del humo negro de los neumáticos y la materia volátil liberada condensable y no condensable [19].

Dentro de las técnicas utilizadas actualmente para el aprovechamiento de materias primas y residuos, se encuentra que la transesterificación, el hidrot ratamiento, la gasificación, la extracción con solventes y la tecnología de membrana, aún no son sostenibles o viables en su totalidad para la conversión de aceites o desechos en combustible. Sin embargo, la pirólisis al generar productos de alto valor energético y químico, es viable por encima de las técnicas anteriores, aunque es un método que apuesta a la recuperación sostenible de energía, se necesitan más estudios para buscar la reacción óptima y los parámetros de proceso que permitan una mejor conversión, así mismo dentro la pirólisis, la realizada por microondas ha mostrado un mejor desempeño[20, 21].

El potencial de recuperación de energía renovable a partir del caucho natural presente en los neumáticos, se evidencia en los productos resultantes los cuales son gas, fracciones líquidas y sólidas, los productos líquidos y gaseosos obtenidas son una fuente de combustible valiosa, destacando sus propiedades como combustible alternativo en los motores de encendido por compresión [19].

La viabilidad del combustible aceite pirolítico de llanta se restringe por un momento al encontrar algunas barreras por resolver, como lo son el alto contenido de azufre, de compuestos aromáticos y la alta proporción de moléculas pesadas con punto de ebullición por encima de los 350°. Dentro de los estudios realizados para la solución a dicho problema, los autores [6] proponen una estrategia secuencial de hidrot ratamiento e hidrocraqueo, que consta de dos etapas con el fin de superar estas

limitaciones y que el combustible que se produzca de los neumáticos residuales sea de alta calidad.

Es factible utilizar aceite pirolítico en un motor diésel, Kumaravel, et al. desarrollaron una experimentación desde la producción del aceite hasta la inyección en el motor y el análisis de emisiones. La reacción de pirólisis la llevaron a cabo en un entorno de gas inerte, en condiciones de temperatura de 500°C; del mismo modo realizaron análisis de humedad, materia volátil, carbono, hidrógeno, acero, azufre y contenido de cenizas elemental para averiguar el porcentaje de productos. Las mezclas de aceite de pirólisis de neumáticos fueron de 5, 10, 25 y 35 % en volumen con diésel, inyectadas en el motor sin realizar ninguna modificación en el motor [5].

En la literatura también se encuentra la producción de un biocombustible similar al diésel a partir de aceite lubricante residual de motores, el cual contiene hollín de carbón pesado, partículas metálicas, material de tipo goma y otras impurezas [22]. Los autores diseñaron y fabricaron un sistema de producción de combustible y aplicaron el método de destilación pirolítico, donde se midió la densidad, viscosidad, punto de inflamación, poder calorífico, contenido de azufre y se realizó su destilación, además de probarse su rendimiento y emisiones de escape para un motor de prueba diésel. Los resultados arrojaron que aproximadamente 60 centímetros cúbicos de cada 100 centímetros cúbicos del aceite residual se convierten en biocombustible. Los valores de la caracterización del combustible junto con las temperaturas de destilación fueron cercanas a los del diésel, determinando así que se puede usar como combustible en motores diésel sin ningún problema [23].

Finalmente, con el fin de optimizar y expandir las formas ya bien estudiadas del tratamiento de neumáticos y aceites de desecho, para lograr un equilibrio entre economía y protección del medio ambiente, en los últimos años, varios estudios teóricos y aplicados han demostrado que, si se controla cuidadosamente, la pirólisis de los neumáticos y aceites de desecho se puede producir una serie de productos valiosos. Las fuentes nombradas anteriormente, se les denominan fuentes de nueva

generación, en cuanto a la técnica de la pirólisis es importante resaltar que aún se condiciona debido a que se encuentra en muchos países clasificada como una técnica de incineración [7].

### 1.2.3 USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN (RENDIMIENTO Y EMISIONES CONTAMINANTES)

La mayoría de los estudios en todo el mundo están centrados en investigar cada vez más el rendimiento de los biocombustibles y las emisiones en los motores diésel [24]. Los motores de encendido por compresión (MEC) se destacan en el campo del transporte comercial y de la maquinaria agrícola, lo que ha conllevado a que la demanda de combustible diésel sea mayor que la de gasolina, lo que ha llevado a la búsqueda de combustibles alternativos para abastecer la demanda y solucionar los problemas medio ambientales que el diésel causa, ya sea de forma parcial o total. Tanto la producción de biodiésel como su implementación en motores de encendido por compresión se ha venido estudiando de manera acelerada ya que es una energía eficiente, limpia, con la capacidad de ser altamente biodegradable y una buena propiedad lubricante cuando se usa en los MEC [25].

Algunas de las propiedades físicas y químicas del combustible diésel como potencia del motor, aumento del poder calorífico, disminución en la emisión de óxidos de nitrógeno, son de gran preocupación y deben ser mejoradas para que el uso del biodiésel sea apto en forma limpia, es decir poder usar biodiésel en un 100 %. El biodiésel como alternativa de combustible sólo puede usarse con éxito en los motores de encendido de compresión, sólo si al hacer su caracterización fisicoquímica cumplen con las especificaciones internacionales estándar de biodiésel. Actualmente el biodiésel es compatible en forma de mezcla con diésel derivado del petróleo en porcentaje de 20 % (biodiésel) y 80 % (diésel) [25].

Una de las preocupaciones más importantes es la oxidación y la polimerización del combustible biodiésel que se producen debido a la presencia de cadenas de ácidos grasos insaturados y al doble enlace en la molécula parental, reaccionando con el oxígeno tan pronto como se expone al aire durante la combustión y el almacenamiento, lo que provoca que el combustible se vuelva ácido, forme una goma y sedimentos no solubles que pueden taponar los filtros.

Las características de rendimiento, combustión y emisión de cualquier motor alimentado con biodiésel dependen de las propiedades termofísicas del biodiésel. Las principales propiedades del biodiésel que deben considerarse son la viscosidad, la densidad, el número de cetano, el poder calorífico, los puntos de inflamación y de ignición, el punto de nube y el punto de fluidez. Varios investigadores han informado que las propiedades del biodiésel dependen de sus contenidos de ácidos grasos y composiciones químicas. Por lo tanto, antes de usar el biodiésel en un motor de encendido por compresión, es obligatorio medir sus propiedades según lo especificado por las normas ASTM D6751 y EN 14214, que son las normas más populares y conocidas para el biodiésel [26].

La medición de las propiedades fisicoquímicas del combustible a utilizar en un motor son de gran importancia, ya que estas determinarán los parámetros de rendimiento y emisiones en el motor de encendido por compresión. Las variables operativas como la presión de inyección, la relación de compresión, el retardo de encendido, la relación aire combustible, la turbulencia del aire dentro de la cámara de combustión y otros factores, afectan directamente las características de rendimiento en un motor de encendido por compresión. La mezcla diésel-biodiésel se puede usar en los MEC sin ninguna modificación del motor y el efecto de la adición de biocombustible se puede analizar determinando las características de rendimiento como la eficiencia térmica al freno, el consumo de combustible específico al freno, el consumo de energía específica al freno y la generacional de emisiones [27].

Algunos de los estudios de emisiones de motores de encendido por compresión

alimentados por mezclas binarias se enuncian a continuación. Saravanan et al. [28] informaron que el éster metílico del aceite de Mahua en un motor diésel reduce un 26 % el monóxido de carbono, un 20 % de hidrocarburos, un 4 % de  $\text{NO}_x$  y un 15 % de humo en condiciones de plena carga que el combustible diésel. Rao et al. [29] encontró que el biodiésel de *Jatropha* puro y el biodiésel de *Jatropha* precalentado ofrecen menos emisiones del motor, excepto las emisiones de  $\text{NO}_x$  que las del combustible diésel. Las mayores emisiones de  $\text{NO}_x$  se atribuyeron a los ácidos grasos insaturados, así como al tiempo de inyección [30]. Nabi et al. [31] informaron que el biodiésel de *Pongamia* redujo el CO en un 50 % y el humo en un 43 %, pero aumentó la emisión de  $\text{NO}_x$  en un 15 % a una mayor carga del motor debido a los mayores contenidos de oxígeno en el biodiésel. Raheman y Phadataré [32] también encontraron que las mezclas de biodiésel Karanja (B20–B100) en un motor diésel reducen la emisión de CO (73–94 %), la densidad del humo (20–80 %) y el 26 % de emisiones de  $\text{NO}_x$  que el combustible diésel debido a la combustión completa de la mezcla con biodiésel. Las mezclas de biodiésel con aceite de cocina usado en un motor diésel redujeron las emisiones de CO, las PM y las emisiones de  $\text{SO}_2$ , pero aumentaron las emisiones de  $\text{NO}_x$  [32, 33].

En cuanto a investigación de uso de mezclas ternarias, la más común es la mezcla de etanol-biodiésel-diésel. Fang et al. [34] encontraron que el combustible mezclado ternario produce menores emisiones de  $\text{NO}_x$ , humo y mayores emisiones de HC y CO debido al alto calor latente de vaporización, lo que provoca una menor temperatura de combustión. Pero los picos de emisiones de humo se redujeron en gran medida con el aumento del porcentaje de etanol en los combustibles mezclados. El etanol en la mezcla de biodiésel y diésel es perfecto para reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  en los MEC. Zhu et al. [34] informaron que la adición de etanol a la mezcla binaria de biodiésel-diésel disminuyó la concentración del número de partículas y la emisión de partículas en masa también. El uso de etanol en la mezcla de biodiésel y diésel muestra un mayor consumo de combustible y de emisiones de CO y HC, pero menores emisiones de  $\text{NO}_x$  que el combustible diésel [35].

Hulwan y Joshi [36] encontraron que el combustible mezclado produce un mayor consumo de combustible específico al freno, una pequeña mejora de la eficiencia térmica y una reducción de la opacidad del humo a altas cargas. La variación de la emisión de  $\text{NO}_x$  depende de las condiciones de operación. En condiciones de carga más bajas, las emisiones de CO aumentan en comparación con el combustible diésel. Las mezclas ternarias mejoran ligeramente el rendimiento del motor y reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$ , PM, CO y HC en comparación con el combustible diésel. De manera excepcional, una mayor cantidad de etanol en la mezcla de biodiésel y diésel podría aumentar las emisiones de CO y de HC, al tiempo que reduce significativamente las emisiones de  $\text{NO}_x$  y PM [24].

El uso de mezclas binarias diésel-biodiésel y mezclas ternarias etanol-biodiésel-diésel favorece la reducción de emisiones de CO y  $\text{CO}_2$ , debido que el combustible tiene un mayor contenido de oxígeno. En cuanto a las emisiones de  $\text{NO}_x$ , estas aumentan cuando se utiliza este tipo de mezclas debido al mayor número de cetano, contenido de oxígeno y tiempo de inyección. La emisión de HC se reduce ya que los altos contenidos de oxígeno ayudan a completar la combustión, del mismo modo la emisión de PM se reduce por el pequeño contenido de compuestos aromáticos y altos compuestos de oxígeno.

Según los autores [24], técnicamente es factible utilizar una pequeña proporción de etanol con biodiésel y diésel en motores diésel de carga pequeña y mediana con modificaciones menores o sin modificaciones. Alrededor del 5 a 10 % de etanol con 20 a 25 % de biodiésel se puede agregar con el diésel de manera efectiva y eficiente para reducir la emisión de gases de escape y así mantener mejor la calidad del aire y la salud humana.

El aceite ligero o también denominado pale oil es un aceite con un contenido altamente nafténico que se utiliza en aplicaciones de temperatura moderada, principalmente para la fabricación de fluidos para trabajar metales, grasas y otros fluidos industriales y anticorrosivos, siendo un compuesto prometedor como alternativa al

diésel. Este trabajo se basa en la caracterización fisicoquímica de mezclas binarias y ternarias, así como también del análisis de sus emisiones contaminantes al ambiente al utilizarse en un motor de encendido por compresión, a través de la caracterización de cada uno de los combustibles por medio de la medición de su gravedad específica, curva de destilación, poder calorífico, cálculo de viscosidad, número de cetano y densidad, junto con las emisiones contaminantes de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HC}$  y  $\text{PM}$  en el motor de encendido por compresión.

## 1.3 HIPÓTESIS

La inyección de mezclas binarias y ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero en motores de encendido por compresión, mostrarán un comportamiento similar que el combustible diésel, ya que sus propiedades fisicoquímicas son semejantes a las del diésel, siendo factible su utilización, requiriendo del estudio de las emisiones contaminantes por su combustión, esto con el fin de evaluar la afectación de su uso al ambiente.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar fisicoquímicamente mezclas binarias y ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero, así como medir y analizar las emisiones contaminantes emitidas por su combustión en motores de encendido por compresión.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar fisicoquímicamente cada uno de los combustibles puros en estudio.
- Definir mezclas binarias y ternarias a evaluar.
- Caracterizar fisicoquímicamente a nivel laboratorio mezclas aditivas diésel-biodiésel-aceite ligero.
- Medir y analizar las emisiones contaminantes de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$  y  $\text{PM}$  de la combustión para cada una de las mezclas inyectadas.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

*El presente capítulo se centrará en las bases teóricas necesarias para el desarrollo de la investigación. Se comienza explicando los motores de combustión interna alternativos, así como el proceso de la combustión en motores de encendido por compresión, junto con los combustibles y sus características. Finalmente se exponen conceptos de biocombustibles en específico del biodiésel.*

## 2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

Los primeros motores de combustión interna alternativos fueron las maquinas de vapor, las cuales fueron creadas durante la primer revolución industrial para el siglo XVIII, siendo capaces de producir con buenos rendimientos energía mecánica no natural. Así el primer motor de combustión interna alternativo es patentado para el año 1860 por el belga Étienne Lenoir quien construyó y comercializó un Motor de aire dilatado con la combustión de los gases por medio de la electricidad con una potencia entre 6 y 20 HP [37].

Los motores de combustión interna alternativos tienen un amplio campo de aplicaciones debido a sus amplias ventajas en la utilización de este tipo de motores con respecto a los demás, como lo es el rendimiento, la potencia, combustibles y sus múltiples características constructivas.

Dichos motores se pueden clasificar a través de diferentes criterios como el ciclo de combustión, el ciclo de trabajo, forma de alimentación del aire y del combustible en el cilindro, el tipo de combustible, el sistema de control utilizado, el tipo de refrigeración, el número de cilindros, entre otros. Sin embargo, una forma común de clasificación se da según el proceso de combustión ya que al conseguir procesos de combustión diferentes es preciso utilizar diseños constructivos específicos y condiciones particulares en cada tipo, clasificándose en motor de encendido provocado (MEP) y motor de encendido por compresión (MEC). Los MEP se caracterizan porque el inicio de la combustión se da por un aporte de energía externo al ciclo termodinámico por medio de una chispa entre dos electrodos de una bujía y la mezcla aire combustible es homogénea, mientras que los MEC la combustión se da por un proceso de autoencendido de la mezcla aire combustible, esto se consigue al alcanzar temperaturas altas en el cilindro debido al proceso de combustión, a diferencia de los motores MEP la mezcla aire combustible de los motores MEC es heterogénea.

### 2.1.1 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

El motor de encendido por compresión o también denominado motor diésel, nació como un motor de inyección directa, donde el combustible era inyectado directamente en la cámara de combustión, sin embargo, su uso se limitaba a grandes motores que funcionaban a bajo régimen de giro debido a las pequeñas velocidades de combustión, lo que llevó a L'Orange en el año de 1909 patentar el concepto de precámara de combustión [37].

El motor diésel original funcionaba inyectándole el combustible por medio de aire comprimido, el cual atomizaba el combustible y lo introducía al motor a través de la tobera que se abría y se cerraba por medio de una leva. A medida que trascurrió el tiempo se fue desarrollando e implementando más tecnología con el fin de mejorar el rendimiento de estos motores, especialmente en lo concerniente al sistema de inyección diésel en el motor, donde sus estudios vienen concentrándose desde el año de 1927, año en el que Bosch, fabricó las primeras bombas de inyección en línea.

El motor diésel es un motor térmico que tiene combustión interna alternativa que se produce por la auto ignición del combustible, debido a las altas temperaturas, resultado de la alta relación de compresión que se presenta. Es un motor muy eficiente en términos termodinámicos, alcanzando más del 55 % de eficiencia [37].

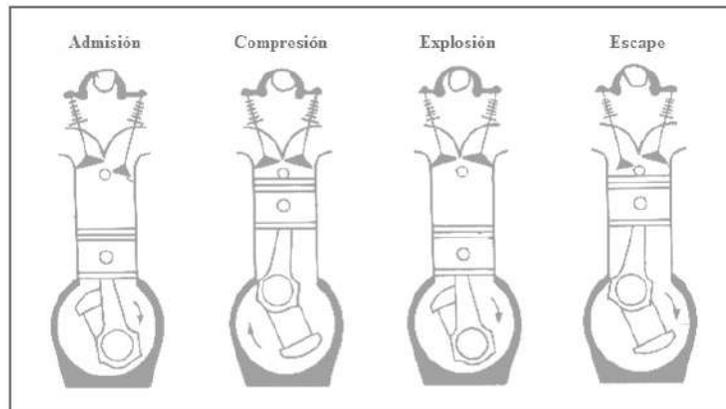


Figura 2.1: Fases de un motor de 4 tiempos

El ciclo de trabajo en un motor diésel se realiza en cuatro carreras del émbolo como se muestra en la Figura 2.1, por lo que se le atribuye la denominación de motor de 4 tiempos.

- **Admisión.** Teniendo la válvula de admisión abiertas y las de escape cerradas, el émbolo se desplaza desde el punto muerto superior al punto muerto inferior induciendo la entrada de aire.
- **Compresión.** En este ciclo las válvulas de admisión y de escape se encuentran cerradas, el émbolo se desplaza desde el punto muerto inferior al punto muerto superior, comprimiendo el fluido, una vez el émbolo se aproxima al punto muerto superior se inyecta el combustible al cilindro, produciéndose la combustión.
- **Explosión.** Al iniciarse la combustión, esta provoca un aumento de presión del cilindro, empujando el émbolo hacia el punto muerto inferior, este desplazamiento es el que genera el trabajo.
- **Escape.** Una vez el émbolo está en el punto muerto inferior, se desplaza hacia el punto muerto superior expulsando los gases quemados hacia el exterior del cilindro.

La formación de la mezcla y la combustión en los MEC están muy relacionadas entre sí y se puede decir que se producen al mismo tiempo. Su proceso de formación de la mezcla se caracteriza inicialmente porque la inyección debe comenzar en un punto perfectamente definido y con una ley definida, de manera que haya una mínima emisión de contaminantes y un alto rendimiento en el desarrollo del proceso de combustión. La cantidad de aire con la que trabaja el motor básicamente no cambia al regular la carga, pero el dosado sí varía drásticamente. En cuanto al régimen de giro, éste se limita debido al tiempo de inyección, atomización, mezcla con el aire y combustión. Así, lo anterior conlleva a que el sistema de inyección sea capaz de

alcanzar características físicas del combustible que ayuden al proceso de mezcla y a la combustión completa del mismo.

La mezcla aire-combustible en un motor de encendido por compresión se forma a elevada temperatura y es inestable químicamente, lo que hace que tenga una facilidad al autoencendido en un tiempo muy pequeño de hasta 2 milisegundos, lo anterior en condiciones de funcionamiento normal del motor.

Los siguientes parámetros nominales definen las condiciones de contorno en las que ocurre el proceso de inyección-combustión en condiciones normales:

- Tobera de inyección con 5-8 orificios, de diámetro entre 100 y 200  $\mu\text{m}$ .
- Presión de inyección entre 500 y 2000 bar.
- Densidad del aire en cámara entre 10 y 50  $\text{kg}/\text{m}^3$ .
- Temperatura del aire en cámara entre 900 y 1000 K.

El funcionamiento de los motores se fundamenta en el proceso de combustión, donde se libera la energía contenida en los enlaces químicos en forma de energía térmica, para que el motor la convierta en energía mecánica, haciéndose importante conocer la cantidad de energía liberada. Cuando la combustión es completa y perfecta se puede calcular según la ecuación 2.1.

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_f PC \quad (2.1)$$

Donde:

$\dot{Q}_{lib}$ : Potencia térmica liberada.

$\dot{m}_f$ : Gasto de combustible.

PC: Poder calorífico del combustible.

## 2.2 COMBUSTIBLES

Los combustibles son sustancias capaces de reaccionar exotérmicamente con el oxígeno, transformando la energía asociada a su estructura molecular en energía térmica. En la Figura 2.2 se muestra una clasificación de los combustibles utilizados en los motores de combustión interna alternativos, es importante resaltar que aunque los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos, debido a que estos motores exigen una alta velocidad de mezcla y de reacción, el combustible se requiere en estado líquido o gaseoso para que se facilite este requerimiento, descartándose por tanto combustibles sólidos como el carbón o la biomasa sin procesar químicamente.

Los combustibles líquidos requieren sistemas que faciliten la evaporación y la mezcla con el oxidante, debido a que la combustión se da en estado gaseoso. La ventaja de estos combustibles es la de poseer un alto poder calorífico, lo que les asegura una gran autonomía y seguridad en su manejo.

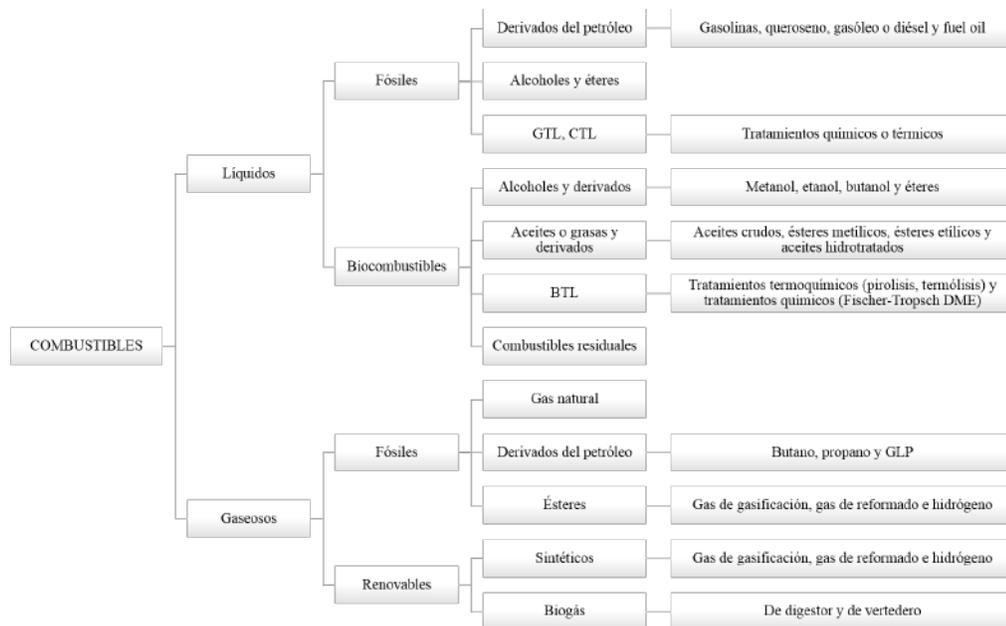


Figura 2.2: Clasificación de los combustibles utilizados en los MCIAs.

El petróleo siendo una mezcla de hidrocarburos líquidos principalmente, el cual

se almacena en yacimientos rocosos en algunas regiones del mundo, actualmente domina la cuarta parte de la energía primaria consumida en el mundo. El petróleo puede variar entre sólido y gaseoso y contiene impurezas como azufre, oxígeno y nitrógeno en diferente proporción dependiendo del yacimiento que provenga. Además existe un grado considerable de variación del petróleo en lo que respecta al color, la gravedad, el olor, el contenido de azufre y la viscosidad, lo cual depende de su composición. Es una mezcla de hidrocarburos alifáticos insaturados, hidrocarburos cíclicos saturados o naftenos e hidrocarburos aromáticos, compuestos que contienen en su estructura molecular carbono e hidrógeno principalmente.

La obtención de los combustibles derivados del petróleo se hace por medio de la refinación de este a través de una columna de destilación, en la cual se realiza la separación de sus componentes mediante la destilación fraccionada. En la columna de destilación se introduce por el fondo el petróleo, este es previamente calentado en un horno cerca a la columna, los diversos componentes ascienden en forma de vapor, condensándose los vapores de los componentes con temperatura de ebullición más elevada, debido a que la temperatura de la columna disminuye en sentido ascendente, por la parte superior de la columna se recogen las fracciones más volátiles y ligeras, y por la inferior las menos volátiles o más densas, las otras fracciones salen a diferentes alturas de la columna según su temperatura de ebullición. Los principales productos de la destilación del petróleo se muestran en la Figura 2.7.

Materia prima	Torre de fraccionamiento	Punto de ebullición [°C]	Cantidad de carbonos	Usos
	<b>GAS</b>	Hasta 40	1 - 5	Gas licuado
	<b>GASOLINA (BENCINA)</b>	40 - 180	6 - 10	Combustibles
	<b>QUEROSENO</b>	180 - 230	11 - 12	Calefacción doméstica (parafina)
	<b>ACEITES LIGEROS</b>	230 - 305	13 - 17	Motores diésel y hornos de petróleo
	<b>ACEITES PESADOS</b>	305 - 405	18 - 25	Lubricantes de motores
<b>PETRÓLEO</b>	<b>VASELINA</b>	405 - 515	26 - 38	Cremas
	<b>ALQUITRANES Y ASFALTOS</b>	Sobre 515	39	Pavimentos

Figura 2.3: Columna de destilación del petróleo y temperaturas de ebullición de los productos.

La gasolina y el diésel constituyen los principales productos de las refinerías a nivel mundial. Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética brindan a los motores una gran autonomía y sencillez al sistema de alimentación. Estas ventajas, junto con otras especificaciones de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para su consumo en motores de combustión interna y en particular para su consumo en el sector de la automoción. Por otra parte, las limitaciones impuestas por las normativas de emisiones no sólo han obligado a los fabricantes a desarrollar sistemas de combustión y postcombustión cada vez más limpios y eficaces, sino también han arrastrado a la industria petrolera en la carrera tecnológica para lograr menos concentración de emisiones .

### 2.2.1 DIÉSEL

El diésel es un hidrocarburo líquido compuesto por un 75 % de hidrocarburos saturados, principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas, y un 25 % de hidrocarburos aromáticos, incluyendo naftalenos y alcalobencenos. Los valores de las propiedades más importantes de este combustible son: densidad a 15°C en el rango de 820 y 845 kg/m<sup>3</sup>, viscosidad cinemática a 40°C entre 2 y 4.5 mm<sup>2</sup>/s y número de cetano entre 45 y 50.

### 2.2.2 ACEITE LIGERO O PALE OIL

Los pale oil son aceites que tienen un contenido altamente nafténico (en contraste con los aceites de base principalmente parafínicos). Su uso se da en aplicaciones de temperatura moderada, principalmente para la fabricación de fluidos para trabajar metales, grasas y otros fluidos industriales y anticorrosivos. Como balance de propiedades para la composición de caucho es ideal para el procesamiento de polímeros, que también se pueden utilizar como plastificante de extensión de resina y secundario para PVC.

### 2.2.3 BIOCOMBUSTIBLES

Los combustibles procedentes de materias primas renovables se les denomina biocombustibles, pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Existe una gran variedad de biocombustibles, aunque los más estudiados y utilizados en la actualidad son el biodiésel y el bioetanol, los cuales buscan sustituir en los motores de combustión interna no sólo de manera parcial sino de manera total la utilización del diésel y la gasolina, respectivamente.

Inicialmente las alternativas para los motores diésel se centraron en la utiliza-

ción de aceites vegetales, sin embargo el uso directo de estos aceites provocó diversas dificultades, puntualmente las relacionadas con la viscosidad. Se conocen tres calidades de aceites de origen vegetal, el aceite bruto que se obtiene en primer lugar, ya sea a través del prensado o mediante utilización de disolventes, el aceite refinado el cual se somete a limpieza, decoloración y corrección de pH y el aceite esterificado o también llamado biodiésel que es resultado de la reacción química entre el aceite vegetal y un alcohol [38].

### 2.2.3.1 BIODIÉSEL

El proceso químico utilizado para la producción de biodiésel ha sido la transesterificación, reacción química entre un triglicérido contenido es el aceite o grasa animal y un alcohol ligero, normalmente metanol o etanol, que da como producto glicerina y ésteres derivados del ácido graso de partida. En la Figura 2.4 se muestra la estructura de la reacción de transesterificación con metanol.

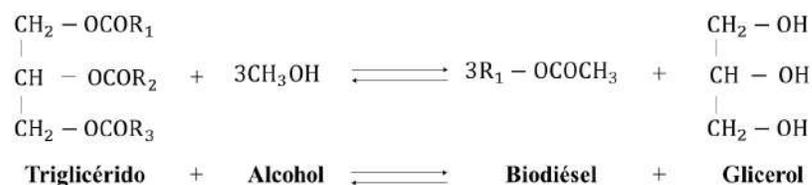


Figura 2.4: Reacción de transesterificación con metanol

Aunque el proceso de obtención del biodiésel está claramente identificado, su definición como compuesto químico permanece difusa. Al contrario que para otros biocombustibles como el bioetanol, no es posible definir el biodiésel a través de su naturaleza química. Esto se debe a que la materia prima utilizada para el proceso de transesterificación es muy variada. Por lo tanto el resultado del proceso químico es una multiplicidad de ésteres de ácidos grasos distintos, en proporciones muy variables. La dificultad para definir satisfactoriamente la naturaleza química del biodiésel es tal que la American Standards for Testing and Materials (ASTM) define dicho

biocombustible según su proceso de obtención y su posterior utilización: ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diésel) o en calderas de calefacción [38].

De acuerdo a lo anterior la norma EN-14214 muestra las especificaciones del biodiésel con respecto a su comportamiento como éster y como combustible, las cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del biodiésel (Unión Europea, EN14214).

PROPIEDADES	UNIDAD	ESPECIFICACIONES
<b>PROPIEDADES COMO COMBUSTIBLE</b>		
Densidad a 15 °C	g/cm <sup>3</sup>	0.86 - 0.90
Viscosidad Cinemática 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3.5 - 5.0
Punto de Inflamabilidad	°C	>101
Punto de Obstrucción del Filtro Frío (POFF)	°C verano	máx. 0
	°C invierno	máx. <-15
Azufre	mg/kg	máx. 10
Índice de Cetano	-	mín. 51
Contenido en Cenizas	% p/p	máx. 0.02
Contenido en Agua	mg/kg	máx. 500
Partículas Sólidas	g/m <sup>3</sup>	máx. 20
Corrosión al Cobre (3h/50C)	-	máx. 1
Estabilidad a la Oxidación (110C)	horas	6
<b>PROPIEDADES COMO ÉSTER</b>		
Índice de Acidez	mg KOH/g	máx. 0.5
Contenido en Metanol	% p/p	máx. 0.2
Contenido en Monoglicéridos	% p/p	máx. 0.8
Contenido en Diglicéridos	% p/p	máx. 0.2
Contenido en Triglicéridos	% p/p	máx. 0.2
Glicerina ligada	% p/p	máx. 0.2
Glicerina libre	% p/p	máx. 0.02
Glicerina total	% p/p	máx. 0.25
Índice de yodo	-	máx. 120
Metales Alcalinos (Na +K)	mg/kg	máx. 5
Fósforo	mg/kg	máx. 10

### Transesterificación

La transesterificación es el proceso que mejores resultados ha proporcionado

para la fabricación de biodiésel, los reactivos de esta reacción química son triglicéridos y un alcohol monovalente como el metanol o el etanol, así la materia prima para el biodiésel será aquella que contenga triglicéridos (tres moléculas de ácidos grasos y una de glicerol), es importante resaltar que cada una de las reacciones químicas del proceso de transesterificación son reacciones reversibles.

La materia prima por medio de la cual se produce biodiésel se clasifica en tres categorías en función de su procedencia. Dentro de las principales materias primas encontramos los aceites vegetales, aceites de frituras usados y las grasas animales, cada tipo de materias prima tiene ventajas y desventajas que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionarla para la producción de biodiésel. Hoy en día la mayoría de la producción de biodiésel se hace a partir de aceites vegetales tales como:

- Aceites vegetales convencionales: girasol, colza, soja, como, palma.
- Aceites vegetales alternativos: jastropho curcas, brasica carinata.
- Aceites vegetales de final: aceites de oliva de alta acidez.
- Aceites de semillas modificados genéticamente: aceites de girasol de alto oleico.

Para la producción de biodiésel por el proceso de transesterificación es necesario que el aceite que se va a utilizar cumpla con una serie de características con el fin de que el biocombustible cumpla con las especificaciones deseadas. Debido a esta condición generalmente el aceite antes del proceso de transformación a biodiésel pasa por diferentes procesos de desgomado, filtración, neutralización y secado, es importante resaltar que todos los tipos de aceite no pasan por todos los procesos, esto va a depender de la procedencia del mismo.

Una vez el aceite que se eligió como materia prima se encuentre en óptimas condiciones, se efectuó la reacción química que tendrá como producto un aceite con las características del diésel para ser usado en motores de combustión interna, siendo

el proceso de transesterificación el más adecuado, donde la mezcla de un triglicérido con alcoholes monovalentes produce ésteres y glicerina.

Los triglicéridos son un tipo de lípidos formados por una molécula de glicerol que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos saturados o insaturados. De manera que la reacción de transesterificación en términos generales consiste en el intercambio del grupo alcoxi (RO-) del triglicérido por el grupo hidroxilo (OH) del alcohol, específicamente se trata de una reacción química de tres etapas, de las cuales en cada una se produce una molécula de éster como se muestra en la Figura 2.5.

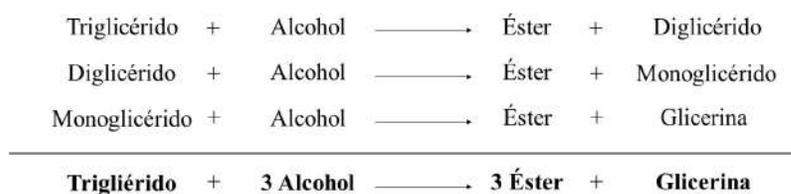


Figura 2.5: Etapas de reacción de transesterificación

Esta reacción se lleva en presencia de un catalizador, ya sea un ácido o una base. Sin embargo, ya en la práctica se comprobó que es necesario adicionar alcohol en exceso para obtener un mejor rendimiento, y conseguir la formación de la totalidad de los ésteres, de la misma manera minimizando la presencia de tri, di, mono-glicéridos en el producto, los cuales se consideran como contaminantes cuando hacen parte del biodiésel.

Estequiométricamente la reacción indica que el rendimiento máximo es aproximadamente igual a uno, por lo que se obtendrá la misma cantidad de biodiésel en comparación con la cantidad de aceite utilizado. La estequiometría entre el alcohol y la glicerina es de la misma manera igual a uno, necesiándose de metanol inicialmente 10 % del aceite. Una vez llevada a cabo la reacción de transesterificación se debe realizar la separación y purificación de los ésteres obtenidos.

Comúnmente la producción de biodiésel se realiza con metanol mediante una

catálisis básica. De acuerdo a lo anterior, la reacción de transesterificación se lleva a cabo entre los triglicéridos del aceite y un exceso de metanol en presencia de un catalizador básico, generalmente se utiliza hidróxido potásico (KOH), a una temperatura que varía entre 40°C y 110°C. Durante la reacción de transesterificación se presentan reacciones secundarias que dan lugar a productos indeseables los cuales contaminan los ésteres. Durante esta etapa del proceso se produce un nuevo compuesto, jabón, obtenido mediante dos reacciones secundarias diferentes. El jabón se produce a través de la reacción de saponificación de los triglicéridos, reacción que compite con la transesterificación. Además, debido a la presencia de ácidos grasos libres en el aceite refinado, se puede dar la reacción de neutralización, obteniendo así jabón y agua. En la Figura 2.6 se ilustran las reacciones principales en el proceso de transesterificación.



Figura 2.6: Principales reacciones secundarias en el proceso de transesterificación

Estas reacciones secundarias del proceso de transesterificación causan una disminución de la conversión y del rendimiento, además de la utilización de procesos de purificación de los ésteres y la posibilidad de que se presenten emulsiones en dicho proceso.

Una vez terminada la reacción química es fundamental la etapa de separación del biodiésel de la glicerina, además de la purificación de los ésteres producidos. Dentro de los compuestos que hay que separar de los ésteres metílicos están los tri, di, monoglicéridos y ácidos grasos que no reaccionaron, el metanol en exceso y los restos del catalizador junto con la glicerina, el jabón y el agua productos de las reacciones secundarias.

Ya separado el biodiésel de los otros subproductos, a éste se le realiza un último proceso de purificación, con el fin de eliminar el exceso de alcohol que se le añadió a la reacción para aumentar el rendimiento, y los ácidos grasos libres que no se esterificaron. Este proceso se hace adicionando agua y ácidos minerales, se realiza nuevamente una separación de las fases y ya los ésteres producidos quedan listos para su utilización como biodiésel.

Dentro de los factores que influyen en el proceso de producción de biodiésel se destacan el tipo de catalizador y el tipo de proceso, además la reacción de transesterificación, al ser una reacción endotérmica, la velocidad de formación de los productos aumenta según aumente la temperatura de la misma, sin embargo la temperatura y la presión de la reacción están sujetas al tipo de catalizador a usarse. La reacción puede ser catalizada por compuestos alcalinos o ácidos, la catálisis alcalina suele ser la más utilizada debido a que la reacción con dicho catalizador requiere condiciones de presión y temperatura menos exigentes, que los compuestos ácidos. Los catalizadores alcalinos más comunes son el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), ya que las temperaturas que se requieren para la reacción son bajas, aproximadamente la temperatura de ebullición de alcohol.

## 2.3 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES

### 2.3.1 DENSIDAD

La densidad  $\rho$  es la masa por unidad de volumen, si el combustible es un líquido, la densidad depende ligeramente de la presión y en mayor medida de la temperatura. La densidad de algunos combustibles se menciona a continuación en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Densidad y viscosidad de algunos combustibles líquidos.

Combustible	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) @ 15°C	$\nu$ (cSt) @ 40°C
Metanol	791.3	0.58
Etanol	789.4	1.13
Butanol	809.7	2.22
Gasolina	720 - 775	0.65
Diésel	820 - 845	2 - 4.5
Fuel-oil	920 - 950	100 - 1000
Biodiésel (FAME)	860 - 900	3.5 - 5
Ficher-Tropsch Diésel	770 - 800	2 - 4.5

La determinación de la densidad de los líquidos es medida por medio del método del hidrómetro, de modo que la lectura se obtiene al sumergirlo en el líquido en el nivel de flotación del hidrómetro. La normativa europea permite la medición de la densidad por el método del hidrómetro así como por el método de tubo oscilante, en cualquier caso a la temperatura de 15°C y 1 atmósfera de presión.

Para los combustibles como las gasolinas, diésel y biodiésel la densidad se debe encontrar en el rango de 720 a 775 kg/m<sup>3</sup>, 820 a 845 kg/m<sup>3</sup> y 860 a 900 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. La no coincidencia entre los rangos supone, en la práctica, una limitación para las mezclas gasolina-etanol y diésel-biodiésel.

### 2.3.2 VISCOSIDAD

Un parámetro importante es la viscosidad cinemática de un combustible líquido ( $\nu$ ), su valor debe ser suficientemente bajo como para poder circular por los circuitos de alimentación sin excesivas pérdidas de carga, y en algunos casos como el diésel y el fuel-oil, lo suficientemente alto como para cumplir con unas ciertas exigencias lubricantes.

La medición de la viscosidad cinemática de un combustible o lubricantes se hace a través de un viscosímetro, el cual consiste en tubos capilares a través de

los cuales fluye un volumen calibrado bajo una columna de líquido reproducible, en un tiempo determinado, que es proporcional a la viscosidad, siendo la constante de proporcionalidad la calibración del viscosímetro. Según la norma europea EN-3104, la medición de la viscosidad debe tener realizarse a condiciones de temperatura de 40°C. Los valores de viscosidad de algunos combustibles líquidos se muestran en la Tabla 2.2. La viscosidad del diésel y del biodiésel están en el rango de 2 a 4.5 y de 3.5 a 5 cSt respectivamente.

### 2.3.3 LUBRICIDAD

La lubricidad es otra propiedad a tener en cuenta en el caso del diésel, y es la que indica la capacidad lubricante del mismo. Esta se cuantifica por medio del diámetro de la huella en micras generada en ensayos de desgaste entre una bola sometida a un movimiento oscilatorio y un disco plano bañado por el combustible. El procedimiento de este ensayo está establecido en la norma europea EN-12156 y se realiza sobre un banco de ensayos denominado HFRR (High Frequency Reciprocating Rig). En Europa se exige que la huella, una vez corregida no supere 460 micras.

Por medio de aditivos o añadiendo biodiésel al diésel, se restaura la perdida de lubricidad que es ocasionada por los procesos de desulfuración, mejorando las propiedades lubricantes del diésel derivado del petróleo.

### 2.3.4 INFLAMILIDAD

El comportamiento de un combustible lo describen una serie de características frente o durante la combustión entre las cuales se pueden destacar los límites de inflamabilidad, temperatura de inflamabilidad, temperatura de autoinflamabilidad, número de octano, número de metano y número de cetano. Los límites de inflamabilidad son dos, el superior y el inferior los cuales dependen de la presión y de la temperatura,

rango en el cual se encuentra la relación de mezcla combustible/aire, lo que permite que la llama progrese, fuera de estos límites la llama se extingue. La temperatura de inflamabilidad o flash point es la mínima temperatura a la que existe el peligro de inflamación de un combustible ante la proximidad de un agente exterior, a presión ambiental. La temperatura de autoinflamación es la mínima temperatura a la que un combustible se autoenciende al entrar en contacto con el aire, lo cual depende de la presión y de la relación de mezcla.

El número de octano, es una propiedad de la gasolina y es una medida de la resistencia a la autoinflamación de esta, su valor numérico indica la concentración de isoctano en n-heptano, los cuales se le otorga valor de 100 y 0 respectivamente. El número de metano de la misma manera que el número de octano indica también la resistencia a la autoinflamación, en este caso el combustible en estado gaseoso. Finalmente, el número de cetano al contrario que el número de octano y el número de metano es un índice que se utiliza para caracterizar la volatilidad y facilidad de inflamación de los combustibles utilizados en un motor diésel, su valor indica la concentración de cetano (n-hexadecano) en isocetano (heptametilnonano), a los cuales se le asignan valores de 100 y 15 respectivamente.

### 2.3.5 VOLATILIDAD

La volatilidad es la tendencia de una sustancia líquida a evaporarse bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. Un combustible tiene mayor volatilidad cuanto menor es su temperatura de ebullición. Los combustibles, al estar conformados por varios componentes no tienen un punto de ebullición fijo y su volatilidad se determina por medio de la curva de destilación obtenida con la norma ASTM D86 a presión atmosférica. La curva de destilación indica el porcentaje de volumen vaporizado de combustible en función de la temperatura. Las curvas de destilación de los combustibles más comúnmente utilizados se pueden observar en la Figura 2.7.

La volatilidad de los combustibles de igual manera está relacionada a la presión de vapor, presión a la cual se da un equilibrio liquido/vapor a una temperatura de  $38^{\circ}\text{C}$ , un líquido es más volátil cuanto su valor de presión de vapor es mayor

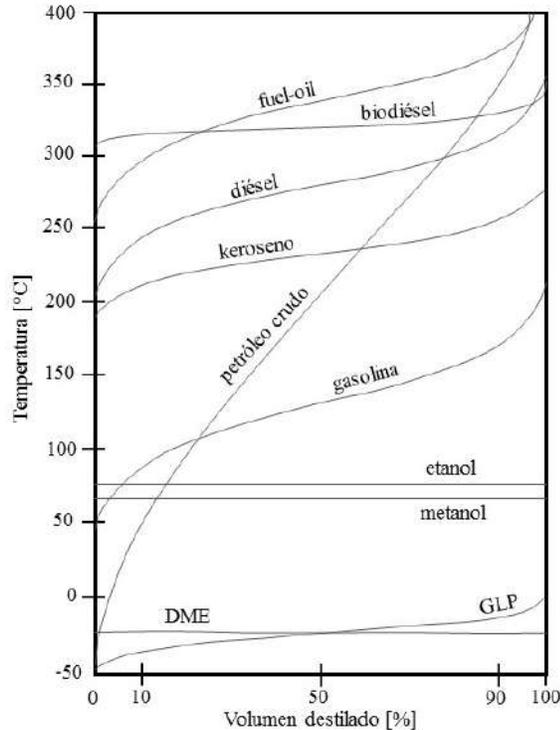


Figura 2.7: Curvas de destilación de combustibles comunes

### 2.3.6 PROPIEDADES DE FLUJO EN FRÍO

Se les denomina propiedades de flujo en frío de un combustible, a aquellas propiedades que están relacionadas con la tendencia del mismo a que se formen cristales cuando la temperatura desciende, lo que puede ocasionar en el motor un taponamiento de el sistema de alimentación y de inyección. Estas propiedades dependen de la composición y estructura molecular del combustible, los parámetros que más las afectan son las longitudes de cadena, el grado de saturación y la ramificación de la molécula. Las propiedades de flujo en frío que se usan son el punto de nube, punto de vertido, punto de obstrucción de filtros en frío y filtrabilidad.

- Punto de nube: temperatura a la cual se forman los primeros cristales o ceras cuando se somete a enfriamiento un combustible.
- Punto de vertido: temperatura a la que todo el combustible toma un estado gelatinoso cuando se somete a enfriamiento, a esa temperatura el combustible no se vierte si se inclina el recipiente el cual lo contiene.
- Punto de obstrucción de filtros en frío: temperatura a la que se obstruyen los filtros a causa de la aglomeración de los cristales formados por el combustible, esta propiedad es medida según la norma ASTM D-6371. Normalmente su valor se encuentra comprendido entre el punto de nube y el punto de vertido.
- Filtrabilidad: Mide la tendencia a la obstrucción de filtros controlando la caída de presión y el caudal a través de este, su determinación se realiza sin llegar a la obstrucción.

### 2.3.7 ESTABILIDAD

La cuantificación de la estabilidad o resistencia a la degradación de un combustible es importante principalmente durante el almacenamiento y puede ser térmica u oxidativa. Los biocombustibles en general son más degradables que los combustibles de carácter fósil, es por eso que estos sustitutos son más costosos, al tener que añadirle aditivos antioxidantes. La estabilidad en los combustibles disminuye con la presencia de enlaces dobles en su composición.

### 2.3.8 IMPUREZAS

Dentro de los parámetros de calidad de los combustibles, algunos de ellos miden las impurezas provenientes de los procesos productivos o de la contaminación

ocurrida en su distribución o almacenamiento. Las impurezas que se cuantifican normalmente son el contenido de azufre y el contenido de agua en los combustibles.

## 2.4 PARÁMETROS TERMOQUÍMICOS DE LOS COMBUSTIBLES

### 2.4.1 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico es la medida del contenido energético de un combustible y se define como la energía liberada en forma de calor en la combustión estequiométrica de una unidad de masa de combustible, donde los reactivos y los productos están bajo las mismas condiciones de temperatura y presión o en su defecto de temperatura y volumen. Para los combustibles que contienen hidrógeno se definen dos valores de poder calorífico, esto debido a que uno de los productos finales de la reacción es agua, por tanto la energía total liberada en un proceso de combustión real variará si el agua esta en estado gaseoso o líquido, siendo la diferencia el calor latente de vaporización del agua.

- Poder calorífico superior: Es el que se obtiene cuando los productos y reactivos están en condiciones estándar, ya que el agua de los productos se ha condensado y ha cedido su calor latente de vaporización.
- Poder calorífico inferior: Es el que se obtiene cuando el agua de los productos permanece en fase vapor.

En la tabla 2.3 se muestran los resultados típicos de valores de poder calorífico superior e inferior de algunos combustibles.

Tabla 2.3: Poder calorífico superior e inferior de algunos combustibles.

<b>Combustible</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>
Metano	55,522	50,032
Propano	50,325	46,334
Butano	49,210	45,277
Metanol	22,884	20,094
Etanol	29,847	26,952
Butanol	36,020	33,090
Gasolina	46,500	43,400
Diésel	45000	42400
Fuel-oil	42,200	40,500
Hidrógeno	142,180	120,210

### 2.4.2 DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO

Se le conoce como dosado a la relación másica entre aire y combustible, cuando la reacción es completa y se consume todo el oxígeno y combustible en la reacción, a esta relación se le denomina dosado estequiométrico. Es importante para el estudio del proceso de combustión conocer este dosado, referido al proceso de combustión estequiométrico con aire en condiciones locales de combustión, por ejemplo cuando el sistema tiene recirculación de gases de escape, la fracción molar del oxígeno en el oxidante es inferior a la del aire, por lo tanto el dosado estequiométrico cambia. El dosado estequiométrico de los combustibles oxigenados es mayor que el de los combustibles no oxigenados, ya que al contener oxígeno en la molécula, sus requerimientos de oxidante externo disminuyen.

### 2.4.3 TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA

Un parámetro importante en el estudio de la combustión es la temperatura adiabática de llama por su efecto de control en la velocidad de las reacciones químicas.

cas, su relevancia en el diseño de zonas calientes en cámaras de combustión, su efecto sobre la formación de óxidos de nitrógeno y su importancia para la determinación de la temperatura de radiación a partir de los productos de combustión. El contenido de oxígeno del combustible, el grado de insaturación y la longitud de la cadena carbonosa son los factores que determinan la temperatura adiabática de llama. La temperatura adiabática de llama del diésel es mayor que la de la gasolina y el biodiésel, así como la de los alcoholes es ligeramente menor que la de la gasolina.

## 2.5 EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DIÉSEL

En la actualidad el estudio de las emisiones contaminantes de los motores ha sido de gran importancia, debido a la alta contaminación que estos provocan, factor que se ha convertido en eje principal al momento de diseñar un motor, debido a las normativas rigurosas que se han establecido hoy en día para el cuidado y la mitigación de daño al medio ambiente.

Dentro de los contaminantes de un motor diésel encontramos los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los hidrocarburos sin quemar (HC), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el material particulado (PM) [39].

- **Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ):** Estos gases son producto de la combinación de oxígeno y nitrógeno a elevadas temperaturas (por ejemplo, una cámara de combustión). Los principales óxidos de nitrógeno son el monóxido de nitrógeno (NO), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el trióxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ) y el pentóxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ); siendo los primeros dos los que se forman en las cámaras de combustión e impactan considerablemente el medio ambiente y la salud, por su toxicidad [40].
- **Hidrocarburos no quemados (HC):** HC o Hidrocarburos no quemados

representa al combustible que sale de la cámara de combustión interna del motor a través del escape sin haberse quemado correctamente. Generalmente su unidad de medida es la de partes por millón (ppm), la cual se utiliza debido a que la concentración de HC en el gas de escape es muy pequeña [41].

- **Monóxido de Carbono (CO):** También es denominado óxido de carbono (II), gas carbonoso y anhídrido carbonoso. Su fórmula química es **CO**. Es un gas incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados [42].

- **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):**

A pesar de su importancia vital para todos los seres vivos al ser la principal fuente de carbono para la vida, el dióxido de carbono es un importante gas de efecto invernadero. La quema de combustibles de carbono ha aumentado rápidamente su concentración en la atmósfera, lo que ha llevado al calentamiento global. Este gas también es el principal causante de la acidificación de los océanos [43].

- **Material Particulado (PM):** Son una serie de diminutos cuerpos sólidos o pequeñas gotas de líquidos dispersos en la atmósfera generadas a partir de alguna actividad antropogénica o natural. Principalmente la combustión incompleta de combustibles de origen fósil y del carbón ocasiona la formación de muchas partículas pequeñas de hollín. Es clave resaltar que no todo el material particulado es igual física y químicamente, varía en tamaños, formas y composición química [44].

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

*En esta sección se presentan la metodología empleada para la realización de esta investigación. Inicialmente se presenta la metodología a nivel general que permite llegar a cumplir el objetivo general de este trabajo, luego se detallan las herramientas experimentales que se utilizan para la realización de este proyecto, se describe el método de obtención de la gravedad específica según la norma ASTM D86-04, el método de destilación a presión atmosférica conforme la norma ASTM D1298-99, el método para la determinación del poder calorífico, con base a la norma ASTM-D240 y finalmente la descripción la instalación experimental del motor. Después se expone la caracterización fisicoquímica de los combustibles, la definición de la matriz de experimentos de las mezclas a evaluar y posteriormente el procedimiento para la experimentación en el motor de las mezclas definidas.*

### 3.1 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología del presente trabajo se divide en dos secciones, esquema que se muestra en la Figura 3.1. En primer lugar se caracterizan los tres combustibles que se van a utilizar en el estudio y se diseña la matriz de las mezclas binarias y ternarias, luego se realiza la caracterización fisicoquímica de los mezclas establecidas anteriormente. En la segunda sección, una vez terminado el análisis se describe el proceso de medición de emisiones contaminantes en el motor diésel.

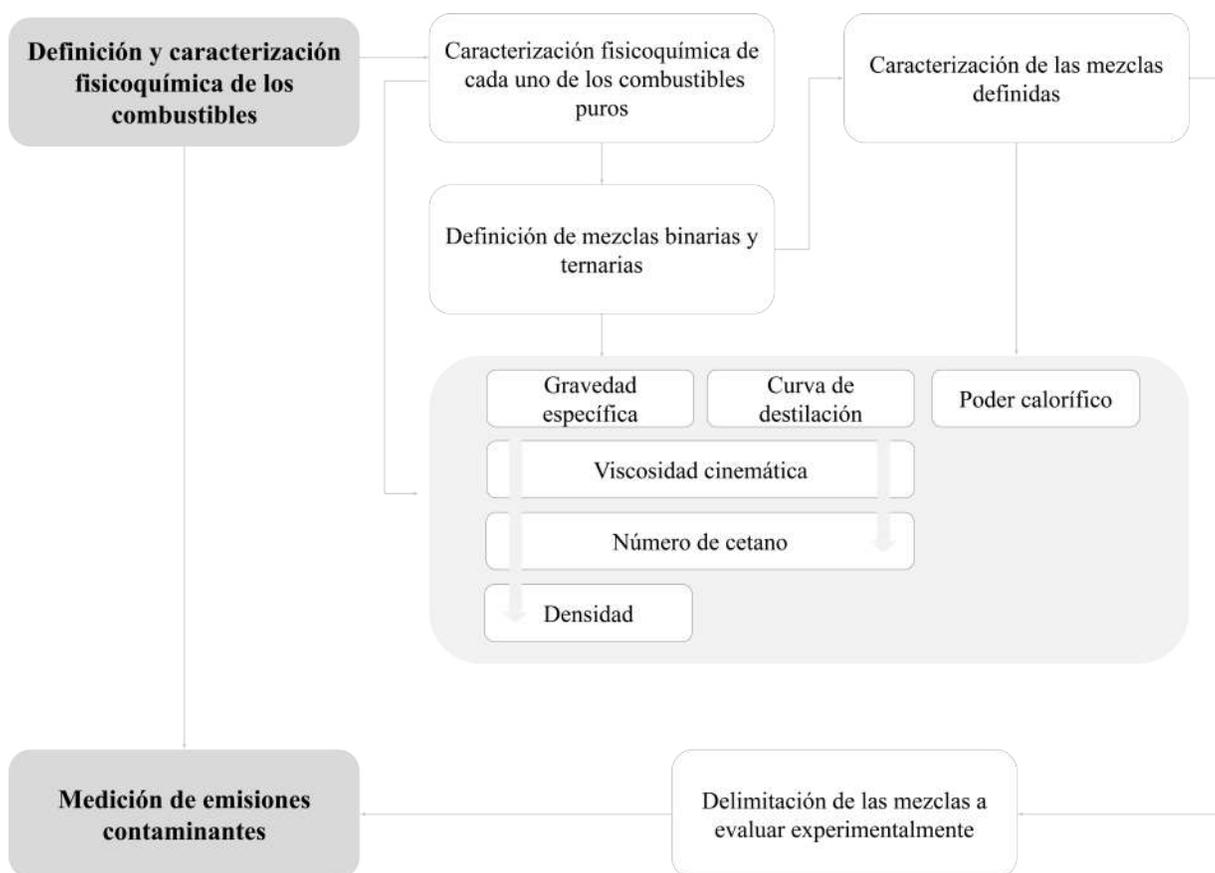


Figura 3.1: Esquema de la metodología general de la investigación

## 3.2 HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

### 3.2.1 MÉTODO DE OBTENCIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

La obtención de la gravedad específica 60/60 °F de los combustibles se realiza conforme a la norma ASTM D1298-99 (Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa, gravedad específica o gravedad API de petróleo crudo y productos de petróleo líquido por el método del hidrómetro) [45]. Este método de prueba consiste en la determinación a nivel laboratorio de la densidad, densidad relativa o gravedad específica, de productos de petróleo, mezclas y productos no petrolíferos normalmente manejados como líquidos y que tienen una presión de vapor Reid igual o menor de 101.325 *kPa*.

El procedimiento que indica la norma pasa la medición de la gravedad específica se enumera a continuación:

1. Se miden 250 ml de muestra y se vierten en una probeta graduada a ese mismo volumen.
2. Se sumerge el hidrómetro de 60/60 °F, dentro de la probeta y se deja estabilizar.
3. Una vez se ha alcanzado el equilibrio térmico, se lee la escala del hidrómetro, como se muestra en la Figura 3.2 y se toma la temperatura de la muestra con un termómetro.

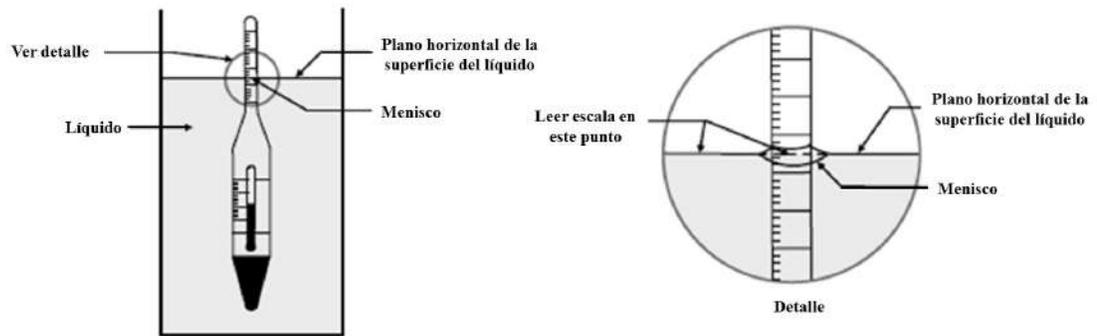


Figura 3.2: Lectura del hidrómetro

Es importante comentar que al momento de realizar este proceso, la temperatura de la muestra y la probeta que la contiene debe de estar a la misma temperatura de referencia 60 °F o 15.56 °C. Si la temperatura observada es distinta a la temperatura de referencia, se corrige la lectura de la gravedad específica mediante la siguiente ecuación:

$$GE_R = \frac{GE_t}{1 - [23 \times 10^{-6}] * (T - R) - 2 \times 10^{-8} * (T - R)^2} \quad (3.1)$$

Donde:

$GE_R$  : Lectura de la gravedad específica a la temperatura de referencia (R) en °C.

$GE_T$  : Lectura de la gravedad específica a la temperatura observada (T) en °C.

### 3.2.2 MÉTODO DE DESTILACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La destilación de los combustibles se realiza según la norma ASTM D86-04 (Método de prueba estándar para la destilación de derivados del petróleo a presión atmosférica) [46]. Este método describe el proceso de destilación atmosférica de pro-

ductos petrolíferos y combustibles líquidos utilizando una unidad de laboratorio de destilación simple.

El equipo de destilación simple consta de un matraz de destilación engler de 100 ml, un condensador recto de 70 cm de largo, un termómetro de mercurio con un rango de temperatura de 0 a 410 °C, una probeta de 100 ml, una mantilla con un rango de temperatura de 0 a 450 °C, un soporte universal, una manguera de látex, una bomba de recirculación con flujo controlable y dos tapones de hule. En la Figura 3.3 se muestra el equipo de destilación.

El método consiste en tomar 100 ml de la muestra a destilar y se vierte en el matraz engler, el termómetro debe estar provisto de un corcho que se ajuste firmemente al matraz, este debe estar centrado en el cuello del matraz, donde el bulbo del termómetro quede alineado al brazo del matraz por donde sale el vapor. Enseguida se calienta la muestra con la mantilla eléctrica, a medida que la temperatura aumenta los compuestos de menor temperatura de ebullición comienzan a evaporarse, condensándose parte del mismo en el termómetro y en la paredes del matraz, gran parte del vapor pasa al condensador donde el vapor se condensa debido a la corriente de agua fría que circula en la camisa y el destilado cae a la probeta donde se observa el volumen de destilado obtenido.

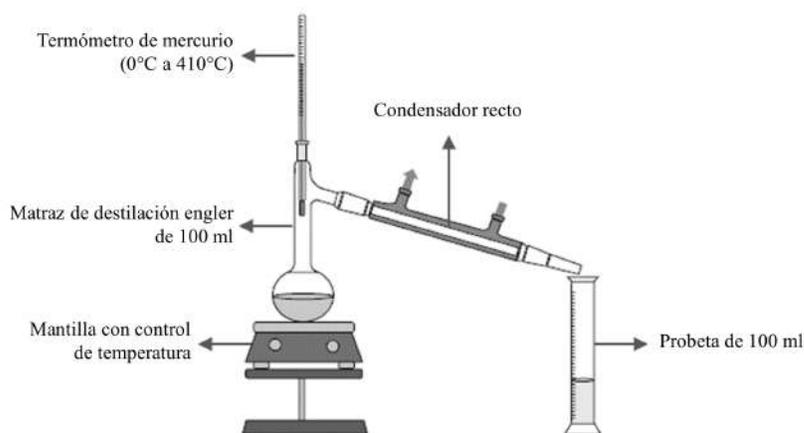


Figura 3.3: Equipo de destilación a nivel laboratorio a presión atmosférica.

Las mediciones se hacen a partir de observaciones sistemáticas de lectura de temperatura y volumen condensado, se registran las temperaturas cada 5% de destilado que va descendiendo en la probeta. Los resultados obtenidos generalmente se registran como porcentaje evaporado o volumen recuperado en función de la temperatura correspondiente, ya sea en una tabla o gráficamente. El punto inicial de ebullición (*Initial Boiling Point*, IBP) se anota en el instante que la primera gota del condensado cae desde el extremo inferior del tubo condensador, y el punto final de ebullición (*Final Boiling Point*, FBP) se anota cuando se ha evaporado la mayor parte del líquido contenido en el fondo del matraz. Por último, se registra el porcentaje total del volumen recuperado y el porcentaje de volumen de residuo. Por lo tanto, el porcentaje de volumen perdido será:

$$V_P = 100 - V_{TR} - V_R \quad (3.2)$$

Donde:

$V_P$  : Volumen perdido

$V_{TR}$  : Volumen total recuperado

$V_R$  : Volumen de residuo

Una corrección en función de la presión barométrica de la prueba y las pérdidas, se le realiza a los datos leídos en la prueba., esta se realiza mediante la ecuación de Sydney Young [47], la cual corrige cada lectura de temperatura a una presión de 101.3 kPa (760 mm Hg):

$$T_c = T + 0.0009(101.3 - P)(273 + T) \quad (3.3)$$

Donde:

$T_c$  = Lectura de temperatura corregida en °C.

$T$  = Lectura de la temperatura observada en °C.

$P$  = Presión barométrica en kPa.

Luego, se realiza la corrección al volumen recuperado por medio de la siguiente ecuación, la cual determina el porcentaje de volumen perdido corregido a una presión de 101.3 *kPa*:

$$V_{PC} = 0.5 + \frac{V_P - 0.5}{1 + [(101.3 - P)/8]} \quad (3.4)$$

Donde:

$V_{PC}$  : Volumen perdido corregido.

Por último, se obtiene el porcentaje de volumen recuperado corregido para cada porcentaje de volumen recuperado a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{RC} = V + (V_P - V_{PC}) \quad (3.5)$$

Donde:

$V_{RC}$ : Volumen recuperado corregido.

Por tanto, el porcentaje total de volumen recuperado y el volumen evaporado se determinan según las ecuaciones 3.6 y 3.7, respectivamente. Donde  $V_{TRC}$  es el volumen total recuperado corregido y  $V_E$  el volumen evaporado.

$$V_{TRC} = V_{TR} + (V_P - V_{PC}) \quad (3.6)$$

$$V_E = V_{RC} + V_{PC} = V + V_P \quad (3.7)$$

### 3.2.3 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

La norma ASTM D-240 [48], indica el procedimiento para la determinación del poder calorífico superior de combustibles líquidos por medio de una bomba calorimétrica adiabática. El método consiste en la combustión de una masa de combustible en atmósfera de oxígeno, en una bomba calorimétrica y en condiciones adiabáticas normalizadas, mediante la ignición de un conductor eléctrico en corto circuito, responsable de la liberación de calor . El PCS se calcula a partir del incremento de la temperatura del agua del vaso calorimétrico, del equivalente calorífico del calorímetro y de la aplicación de correlaciones termoquímicas.

Los componentes del equipo se muestran en la Figura 2.3. Un termómetro con rangos de medición de 19 °C a 35 °C (1), por medio del cual se mide la temperatura del calor liberado del combustible; un lente óptico (2) para visualizar el valor de la temperatura; una varilla de soporte para el termómetro (3); una tapa (4), la cual sujeta el termómetro y el agitador; una banda elástica (5) que conecta la parte superior del agitador con la flecha del motor; un motor (6); un agitador (7); una tina (8) para el agua destilada; un recipiente adiabático (9), componente que contiene a la bomba calorimétrica, la tina y en la parte superior se ajusta con la tapa; dos electrodos(10), los cuales tiene como función conectarse al cabezal de la bomba para llevar a cabo el quemado del combustible y una bomba calorimétrica (11), donde se lleva acabo la explosión del combustible [48].

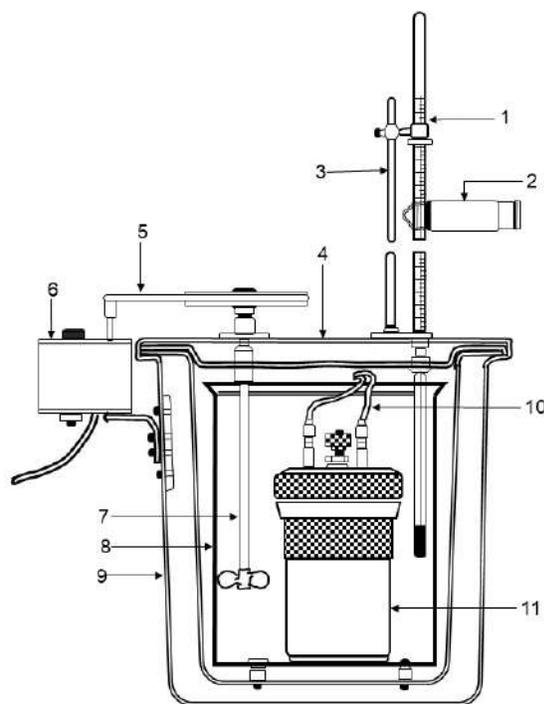


Figura 3.4: Componentes principales que conforman el calorímetro

El método para la determinación del PCS según la norma ASTM D-240 consiste en:

1. Llenar la tina con 2 kg (2000 gr) de agua destilada.
2. Cortar y pesar 10 cm de alambre fusible.
3. Pesar el crisol en la balanza gravimétrica.
4. Pesar 1 gr de muestra y verterlo en el crisol.
5. Montar el crisol con la muestra y el alambre fusible en el cabezal de la bomba, el alambre fusible debe tocar la muestra pero no a la superficie del crisol ya que esto podría provocar un corto circuito.
6. Insertar el cabezal ya con la muestra dentro del cilindro de la bomba calorimétrica y asegurarlo.

7. Presurizar la bomba a 3000 kPa (450 psi, 30 atm) de presión.
8. Sumergir la bomba dentro de la tina y conectar los electrodos a las terminales de la bomba.
9. Colocar la tapa del calorímetro sobre la coraza con la bomba dentro de ella.
10. Unir el agitador con el motor por medio de una banda elástica.
11. La prueba se monitorea tomando la lectura de la temperatura en un lapso de 17 minutos, se toma la temperatura inicial y se inicia la prueba, se pone en marcha el motor y paralelamente se inicia el tiempo en el cronómetro, desde el tiempo cero hasta el minuto 6 que ocurre la combustión presionando un botón de ignición que posee la bomba, transcurrido este tiempo las mediciones de las temperaturas se realizan a cada 15 segundos hasta el minuto 9, después de este tiempo las lecturas se realizan cada 30 segundos hasta el minuto 11, pasado este tiempo, nuevamente las lecturas se toman a cada minuto hasta terminar la prueba minuto 17.

Ya finalizada la prueba, se hace una titulación agregando dos succiones de naranja de metilo a los residuos hasta que estos queden neutralizados. Por último, se obtiene el valor del poder calorífico mediante la siguiente ecuación:

$$Hg = (tW - e_1 - e_2 - e_3)/m \quad (3.8)$$

Donde:

Hg: Es el poder calorífico en MJ/kg.

t: Incremento de la temperatura corregida en °C.

W, Energía equivalente del calorímetro en MJ/°C.

$e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$ : Son correcciones en calorías de la formación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y para el calor de formación del cable fusible respectivamente.

m: Masa del combustible en gr.

El incremento de la temperatura del calorímetro, se determina a partir de la ecuación:

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (3.9)$$

Donde:

t: Incremento de la temperatura corregida en °C.

a: Tiempo de disparo en minutos.

b: Tiempo cuando el aumento de la temperatura alcanza el 60 % del total.

c: Tiempo al comienzo de la prueba, en el cual la temperatura con el tiempo permanece constante, en minutos.

$t_a$ : Temperatura al momento del disparo corregida por el error del termómetro en °C.

$t_c$ : Temperatura en el tiempo corregido por el error del termómetro en °C:

$r_1$ : Rango de incremento de temperatura por minuto, durante los primeros 5 minutos antes del disparo en °C.

$r_2$ : Rango de temperatura por minuto, después de 5 minutos del tiempo c, si la temperatura disminuye,  $r_2$  es negativo y la cantidad  $-r_2(c-b)$  es positiva en °C.

La energía equivalente del calorímetro se determina mediante la ecuación:

$$W = (Hm + e_1 + e_3)/(t) \quad (3.10)$$

Donde:

H: es el calor de combustión del ácido benzoico estándar en MJ/gr [49].

### 3.2.4 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOTOR DIÉSEL

El diagrama de cada uno de los componentes del motor se muestra en la Figura 3.5. La instalación experimental consta de un motor diésel, un sensor de flujo másico, un sensor IR de rpm, un sistema de adquisición y control de datos y un analizador de gases.

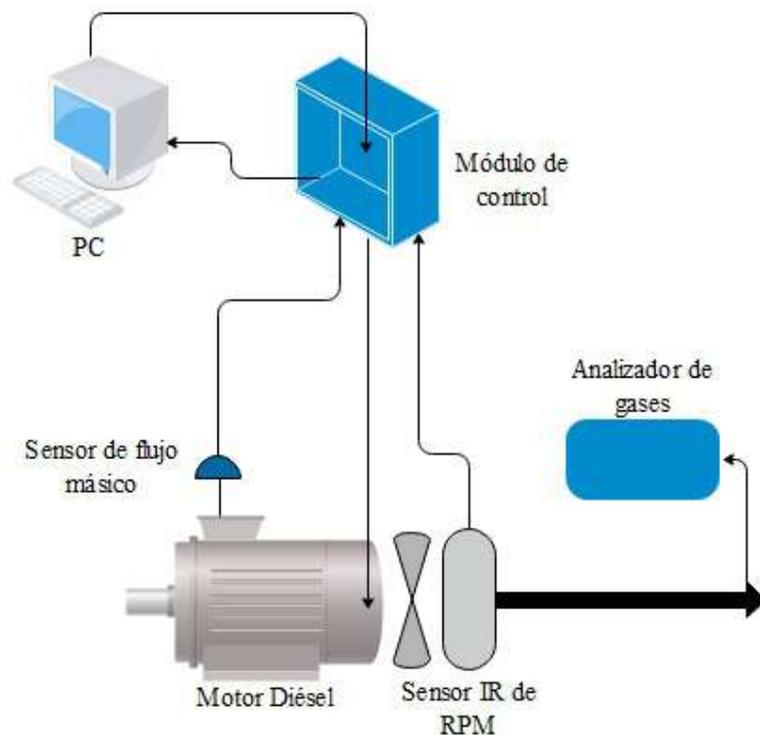


Figura 3.5: Diagrama de la instalación experimental del motor diésel.

El motor diésel que está en la instalación es un motor Cummins de 6 cilindros, modelo 6BTA de 5.9 L, 180 HP @2500 rpm, el cual se muestra en la Figura 3.6. Para el control de las rpm del motor, cuenta con un servomotor de engranaje metálico modelo RB-330 MG, y un sensor infrarojo modelo E18-D80NK para rpm. Además tiene un sistema de control en el Software LabVIEW, por medio del cual se acciona, se acelera y desacelera el motor según lo requerido. De la misma manera cuenta con un medidor de flujo másico de la admisión de aire, que funciona por medio de un

sensor de hilo caliente modelo Pro-M 80 para motor diésel.



Figura 3.6: Motor diésel Cummins de 6 cilindros, modelo 6BTA de 5.9 L

El analizador de gases que tiene la instalación experimental es un analizador de gases combinado MET 6.3, ver Figura 3.7. El analizador consta de equipos básicos, analizador de gases y opacímetro en una carcasa de plástico de alta calidad con unidad de visualización integrada y teclado, una sonda de medición de enrejado de acero 600 mm, manguera de sonda 2000 mm, una interfaz LAN con cable LAN (RJ 45), una fuente de alimentación 110V - 230V, 50/60Hz, una manguera transparente para la separación del condensado con recipiente, un filtro principal, filtro de punto cero y filtro de condensado, un sensor de  $O_2$  electroquímico, unas pinzas trigger para MET 6.3 para el registro inductivo del número de revoluciones en cables de encendido y un software de valores de medición para una medición continua y control del MET.



Figura 3.7: Analizador de gases combinado MET 6.3

El analizador de gases tiene un tiempo de calentamiento pequeño y disponibilidad rápida, realiza análisis preciso de los componentes gaseosos HC, CO, CO<sub>2</sub>, PM y NO<sub>x</sub> con cálculo del valor lambda. Adicional a esto comprueba o diagnostica rápidamente la opacidad o concentración de partículas mediante procedimiento de corriente parcial con aceleración libre o bajo carga del motor. Es importante señalar que el analizador permite visualizar en tiempo real cada una de las mediciones.

### 3.3 CORRELACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DE DENSIDAD, ÍNDICE DE CETANO Y VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La correlaciones para el cálculo de la densidad, la viscosidad cinemática y el índice de cetano de los combustibles puros probados y sus mezclas se obtiene mediante correlaciones empíricas recomendadas para combustibles de hidrocarburos.

### 3.3.1 DENSIDAD

La densidad se obtiene a partir de la gravedad específica 60/60 °F, propiedad que se mide experimentalmente según como se indica en la Sección 3.2.1, la cual se determina a 60 °F ( $\approx 15$  °C) mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{15} = GE \cdot \rho_{agua} \quad (3.11)$$

El termino  $\rho_{agua}$  en la ecuación es la densidad del agua a 15 °C, cuyo valor es de 999.016 Kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

El cálculo de la viscosidad cinemática a presión atmosférica y a temperatura de 100 °F ( $\approx 40$  °C) de cada uno de los combustibles puros, así como la de cada una de las mezclas se realiza a partir de correlaciones empíricas según [50]. El rango de error de cálculo esta entre 5 y 10 %.

$$\begin{aligned} \log \nu_{40} = & 4.39371 - 1.94733 \cdot K + 0.127690 \cdot K^2 + 3.2629 \cdot 10^{-4} \cdot API^2 \\ & - 1.18246 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot API \\ & + \frac{0.17161 \cdot K^2 + 10.9943 \cdot API + 9.50663 \cdot 10^{-2} \cdot API^2 - 0.860218 \cdot K \cdot API}{API + 50.3642 - 4.78231 \cdot K} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \log \nu_{100} = & -0.463634 - 0.166532 \cdot API + 5.13447 \cdot 10^{-4} \cdot API^2 - 8.48995 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot API \\ & + \frac{8.0325 \cdot 10^{-2} \cdot K + 1.24899 \cdot API + 0.197680 \cdot API^2}{API + 26.786 - 2.6296 \cdot K} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Donde:

$\log \nu_{40}$  y  $\log \nu_{100}$ : Viscosidad cinemática a  $\approx 40$  °C y  $\approx 100$  °C, respectivamente en cSt.

API: Gravedad API.

K: Factor de caracterización de Watson.

La gravedad API se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde GE es la gravedad específica 60/60°F:

$$API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \quad (3.14)$$

Otro de los términos para calcular la viscosidad cinemática es el factor de caracterización de Watson, el cual está dado por:

$$K = \frac{MeABP^{1/3}}{GE} \quad (3.15)$$

MeABP es el punto medio de ebullición promedio medio en grados Rankine y se calcula así:

$$MeABP = VABP - \Delta \quad (3.16)$$

$$\ln \Delta = -0.94402 - 0.00865 \cdot (VABP - 32)^{0.6667} + 2.99791 \cdot \left[ \frac{T_{90} - T_{10}}{90 - 10} \right]^{0.333} \quad (3.17)$$

VABP es el punto de ebullición promedio volumétrico, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$VABP = \frac{T_{10} + T_{30} + T_{50} + T_{70} + T_{90}}{5} \quad (3.18)$$

Donde  $T_{10}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{70}$  y  $T_{90}$  son las temperaturas de ebullición a 10, 30, 50, 70 y 90 % de destilado en °F.

### 3.3.3 ÍNDICE DE CETANO

El índice de cetano se determina según lo establecido en la norma ASTM D4737-96a [51], el cual calcula el valor a través de la densidad y las temperaturas de destilación, cuya ecuación y términos se mencionan a continuación:

$$IC = 45.2 + 0.0892 \cdot T_{10N} + (0.131 + 0.901 \cdot B) \cdot T_{50N} + (0.0523 - 0.420 \cdot B) \cdot T_{90N} + 0.00049 \cdot (T_{10N}^2 - T_{90N}^2) + 107 \cdot B + 60 \cdot B^2 \quad (3.19)$$

$$B = [e^{-3.5 \cdot (\rho_{15} - 0.85)}] - 1 \quad (3.20)$$

Donde:

$T_{10N} = T_{10} - 215$ : Temperatura en °C al 10 % de destilado corregida a la presión barométrica.

$T_{50N} = T_{50} - 260$ : Temperatura en °C al 50 % de destilado corregida a la presión barométrica.

$T_{90N} = T_{90} - 215$ : Temperatura en °C al 90 % de destilado corregida a la presión barométrica.

$\rho_{15}$ : Densidad a 15 °C.

## 3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

### 3.4.1 OBTENCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

La gravedad específica 60/60 °F de los combustibles puros, como de igual manera de las mezclas binarias y ternarias se obtiene siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D1298-99, detallado en la Sección 3.2.1.

La gravedad específica de cada muestra se mide por medio de un hidrómetro normalizado marca Alla France de rango de 0.800 a 0.850, con una precisión de 0.0005. Debido a que la temperatura medida es diferente a la temperatura de referencia del hidrómetro, 60 F o 15.56 C, se corrige la lectura de la gravedad específica mediante Ecuación 3.1 como lo indica la norma.

### 3.4.2 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DESTILACIÓN

Los combustibles diésel, biodiésel y aceite ligero, junto con las mezclas binarias que se mencionan en la Tabla 3.2 y las mezclas ternarias que se muestran en la Tabla 3.3, se destilan siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D86-04, procedimiento que se describe en la Sección 3.2.2.

Una vez montado el equipo de destilación y colocado los 100 ml del combustible en el matraz se procede a realizar la prueba, la presión barométrica del lugar se debe registrar. Se registran los puntos inicial (IBP) y final (FBP) de ebullición, además de las temperaturas correspondientes a los volúmenes múltiples porcentuales de 5. Adicionalmente una vez terminada la prueba se registra el volumen total recuperado (% Vol.), el volumen de residuo (% Vol.) que queda en el matraz.

Debido a que la temperatura de trabajo no es de 15°C, se corrigen las temperatu-

ras observadas mediante la Ecuación 3.3, así como se calcula el volumen de pérdidas (% Vol.) a través de la Ecuación 3.2.

### 3.4.3 OBTENCIÓN DEL PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de los combustibles y mezclas se calcula en una bomba calorimétrica marca PARR modelo 1341EB, éste procedimiento se lleva a cabo siguiendo la norma ASTM D240-02, como se describe en la Sección 3.2.3. El poder calorífico se determinó quemando una muestra en un calorímetro de bomba de oxígeno en condiciones controladas y se calcula a partir de las temperaturas observadas antes, durante y después de la combustión. Una vez culminada la prueba, la determinación del poder calorífico se realiza mediante el uso de correlaciones termoquímicas mencionadas en la norma.

### 3.4.4 OBTENCIÓN EMPÍRICA DE LA DENSIDAD, LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y EL ÍNDICE DE CETANO

El cálculo de las propiedades de densidad, viscosidad cinemática e índice cetano de los combustibles y de las mezclas se determina según las correlaciones mencionadas en la Sección 3.3. El valor de la densidad se determina a 60°F o 15.56°F con la gravedad específica 60/60°F según la Ecuación 3.11. El cálculo de la viscosidad cinemática se obtiene a presión atmosférica y a una temperatura de 40°C a partir de la Ecuación 3.12. El índice de cetano se calcula con base a la norma ASTM D4737 por medio de la Ecuación 3.19, la cual proporciona un medio para estimar el índice de cetano de combustibles destilados a partir de su densidad a 15°C y las temperaturas de destilación según como lo indica la norma.

### 3.5 DEFINICIÓN DE MEZCLAS BINARIAS Y TERNARIAS

Los combustibles a trabajar en la presente investigación son: diésel adquirido comercialmente en una distribuidora de combustibles de la ciudad de Monterrey, biodiésel producido a partir de aceite usado de cocina, por el Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad en Biocombustibles (LaNDACBio) con sede en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en la Ciudad de México y aceite ligero adquirido a una empresa privada. En la Figura 3.8 se muestra la curva de destilación del diésel y del biodiésel. Cabe resaltar que la curva de destilación del aceite ligero no se obtiene debido a que por su composición las temperaturas de ebullición que alcanza son muy altas y el sistema de destilación a presión atmosférica no es apto para tal prueba.

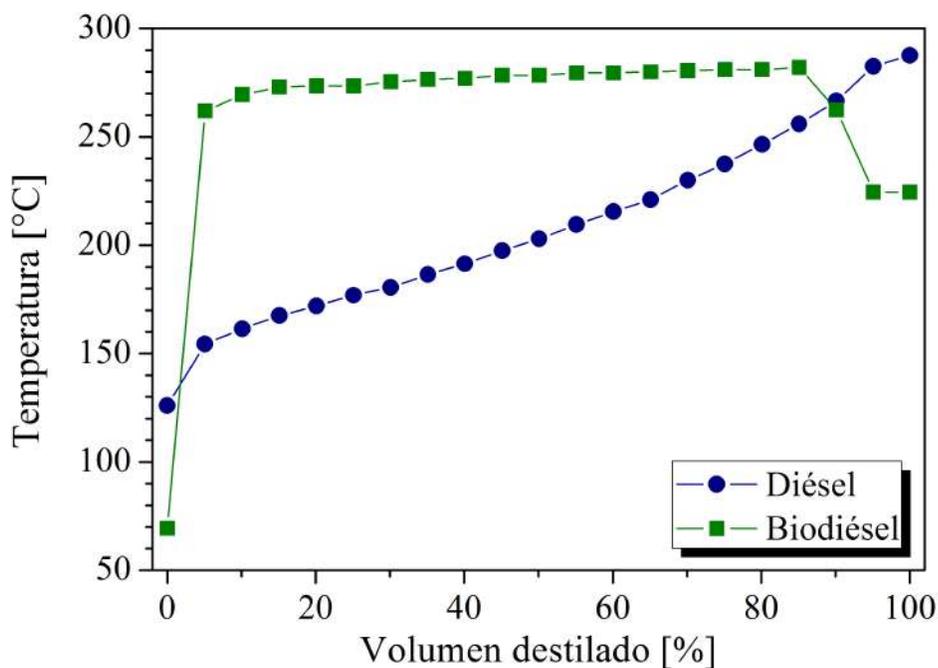


Figura 3.8: Curvas de destilación del diésel y del biodiésel.

En la Tabla 19 se muestran las propiedades de los combustibles, de igual manera,

estos se midieron según lo establecido previamente en el presente trabajo.

Tabla 3.1: Propiedades fisicoquímicas de los combustibles puros.

PROPIEDAD	DIÉSEL	BIODIÉSEL	ACEITE LIGERO
Densidad @ 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	823.189	880.133	878.130
Temperatura de destilación al 90% del volumen recuperado (°C)	266	262	—
Viscosidad cinemática @ 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	1.417	3.712	—
Índice de cetano	38.794	38.714	—
Poder calorífico (MJ/kg)	45.198	39.480	45.293

Una vez caracterizados fisicoquímicamente cada uno de los combustibles, se diseña la matriz de mezclas binarias y ternarias, de acuerdo a los porcentajes más comúnmente usados en los estudios ya realizados con mezclas. En cuanto al porcentaje de biodiésel se evalúan cantidades del 5, 10 y 20 %, porcentaje donde se puede tener seguridad de no causar daños al motor. En cuanto al aceite ligero de la misma manera se evaluarán porcentajes en volumen del 5, 10 y 20 %. Se muestra en la Tabla. 3.2 y 3.3 las mezclas binarias y ternarias definidas, respectivamente.

Tabla 3.2: Relación de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero.

MEZCLA	% VOL. DIÉSEL	% VOL. BIODIÉSEL
D95B5	95	5
D90B10	90	10
D80B20	80	20
D95A5	95	5
D90A10	90	10
D80A20	80	20

Tabla 3.3: Relación de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero.

MEZCLA	% VOL. DIÉSEL	% VOL. BIODIÉSEL	% VOL. ACEITE LIGERO
D90B5A5	90	5	5
D85B5A10	85	5	10
D75B5A20	75	5	20
D85B10A5	85	10	5
D80B10A10	80	10	10
D70B10A20	70	10	20
D750B20A5	85	20	5
D70B20A10	80	20	10
D60B20A20	70	20	20

Las mezclas se prepararon en fracción volumétrica a 25°C, temperatura ambiente del laboratorio. Aunque la preparación de la mezcla con base al peso tiene la ventaja de que la fracción en peso no cambia con la temperatura, la práctica común en la industria del combustible es llevar a cabo el proceso de mezcla en función del volumen a la temperatura ambiente del lugar de mezcla [52], por lo cual se seleccionó trabajar en base a fracciones volumétricas.

## 3.6 MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES

### 3.6.1 PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El banco de pruebas de la SCR del Laboratorio de Físicoquímica de la Combustión cuenta con un sistema DOC-DPF para el postratamiento de gases y con un sistema de Reducción Catalítica Selectiva llamado SCR, que es una tecnología que utiliza un fluido para el sistema de escape basado la inyección de urea y un convertidor catalítico, para reducir significativamente emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).

De acuerdo al objeto del estudio del trabajo investigativo, las emisiones contaminantes de cada una de las mezclas se deben medir antes de que dichos gases pasen por alguno de estos sistemas, con el fin de conocer las concentraciones totales que se emiten al ambiente una vez que cada mezcla se inyecte en el motor. Por lo anterior se diseña un acoplamiento a la tubería que se encuentra entre la salida de los gases de escape y el DOC-DPF, el cual se describe a continuación.

En la Figura 3.9 se muestra el dibujo CAD que se realiza para la adecuación del analizador de gases en la tubería de escape a la salida del motor, la cual consta de dos tubos en forma de (L) de 2 pulgadas de diámetro, con una longitud de 20 cm, en cada uno de los tubos, y dos válvulas de 3 vías, donde se conectará el analizador de gases combinados y un analizador de nanopartículas para trabajos futuros. En el primer tubing se instala el analizador MAHA, una vía conecta al analizador de gases, otra conecta a la línea principal y la otra se deja libre para admisión de aire.

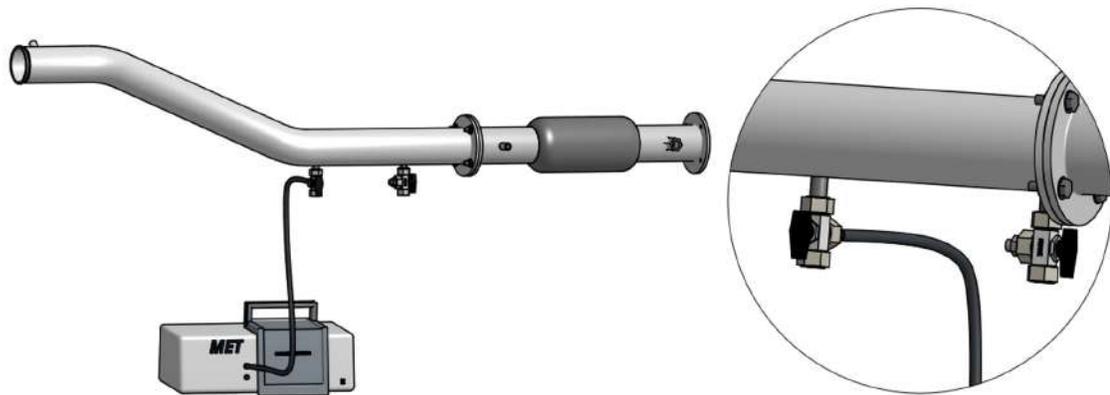


Figura 3.9: Dibujo CAD de la adaptación al escape del motor.

Para acoplar el analizador de gases, se retira la sonda de la manguera y esta se acopla a una de las vías mediante una espiga. La vía que se deja libre al aire se hace con el fin de hacer la prueba de estanqueidad que se realiza antes de iniciar la medición de emisiones en el analizador. Un dibujo de la adecuación de la instalación se muestra en las Figura 3.10.



Figura 3.10: Banco de pruebas motor diésel para la medición de emisiones contaminantes.

### 3.6.2 PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES

Una vez realizada la caracterización fisicoquímica de las mezclas binarias y ternarias establecidas, se procede a la medición de las emisiones contaminantes. Las mezclas se inyectan en el motor Cummins de 6 cilindros, modelo 6BTA de 5.9 L, 180 HP por medio del analizador de gases combinados MET 6.3 descrito en la Sección 3.7, el cual mide concentración de cada uno de los gases de escape. El método que utiliza el equipo es hacer pasar una luz infrarroja por una celda que contiene gas y medir la energía absorbida por cada uno de los gases con sensores de gas químico.

Los software Maha Emission y Maha Emission Viewer, comunican mediante conexión Ethernet al analizador. A través de estos software se llevan a cabo las pruebas de estanqueidad y la puesta a punto cero que se requiere al iniciar las mediciones, además de controlar el inicio y final de la prueba. Del mismo modo por medio del software Maha Emission Viewer se realiza el monitoreo de la prueba ya que su

interfaz permite ver las mediciones en tiempo real, como se muestra en la Figura 3.16.

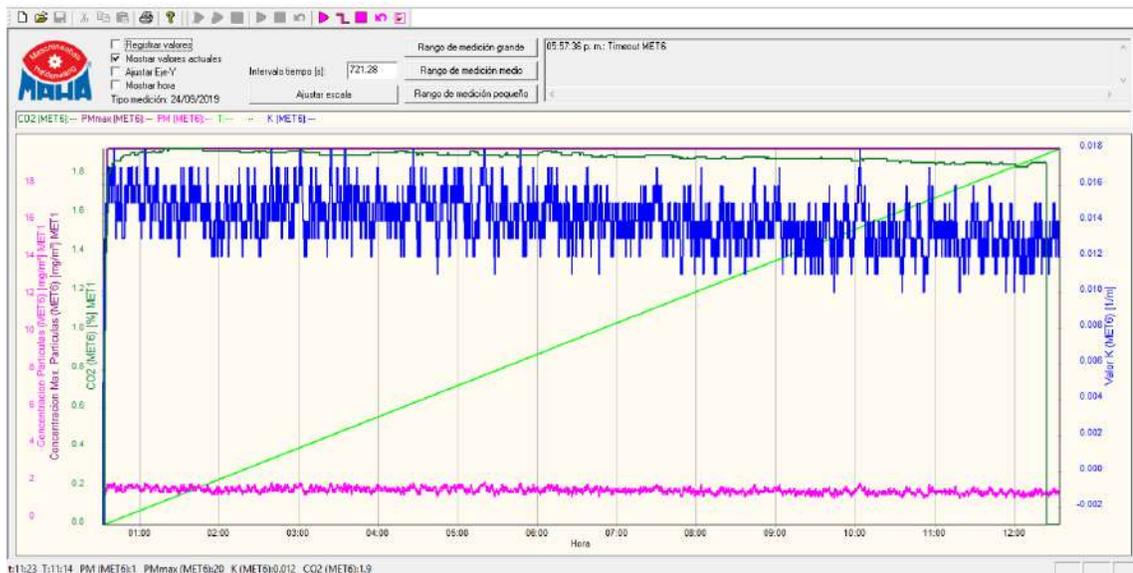


Figura 3.11: Interfaz en tiempo real del software Maha Emission Viewer.

Las condiciones de operación para la experimentación en el banco de pruebas para cada ensayo se mencionan en la Tabla 3.4. Es importante resaltar que todos los ensayos ser realizan bajo las mismas condiciones, por el mismo periodo de tiempo, donde el motor trabaja al vacío sin carga alguna. Se realizan cinco ensayos en el banco de pruebas para cada uno de los ensayos experimentales, esto con el objetivo de verificar repetibilidad en el muestreo, luego se obtienen promedios, valor mínimo y valor máximo para luego graficarse.

Tabla 3.4: Condiciones de operación para la experimentación

PARÁMETRO	VALOR
Régimen de giro	1000 rpm
Tiempo de estabilización de las emisiones contaminantes	50 min
Tiempo de muestreo en el analizador	1 min
Temperatura mínima del aceite	70°C
Temperatura del aceite durante las mediciones	86 - 89°C
Temperatura máxima del refrigerante	90°C

En cada ensayo se miden los gases de escape  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_X$ ,  $\text{HC}$  y  $\text{PM}$ , además de monitorearse el oxígeno, las rpm y la temperatura del aceite. Del mismo modo las rpm también se controlan a través del reloj de régimen de giro en la interfaz de usuario labVIEW, desde donde se acelera y desacelera el motor a las revoluciones que se requiere trabajar. Para la experimentación se establece la metodología que se menciona en la Figura 3.12.

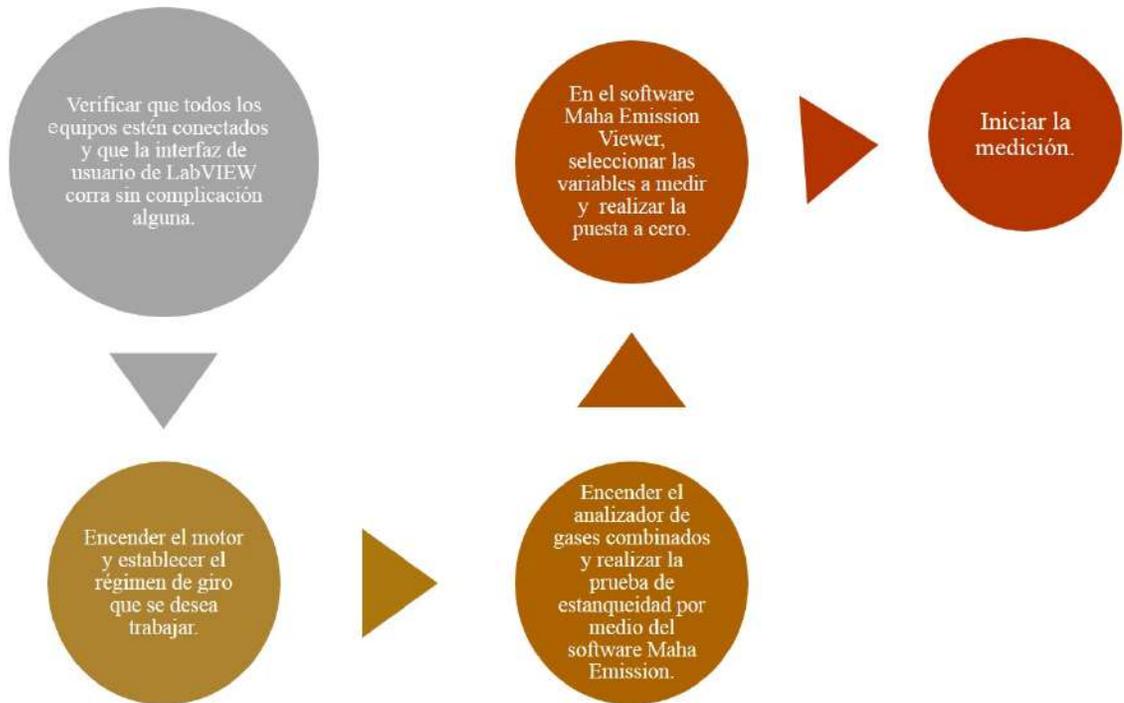


Figura 3.12: Metodología experimental de ensayos.

**Verificación de conexión de los equipos y funcionamiento de la interfaz de usuario de LabVIEW.** Una vez se va a iniciar la experimentación en el laboratorio de la SCR, se inicia por verificar que todos los equipos de la instalación necesarios para la medición estén conectados y funcionando correctamente, se enciende la computadora y en el programa de LabVIEW se abre el archivo prueba 14, donde aparecerá la interfaz de control del motor, es importante recalcar que se debe verificar antes de correr el programa que la caja de los módulos de señal este encendida. Luego se conecta el analizador de gases con su red de cableado para dejarlo

listo para el momento de iniciar los ensayos.

Debido a que el banco de pruebas cuenta con cuatro transductores de presión en la instalación, éste cuenta con un baño de recirculación refrigerado PolyScience PP7LR-20 que regula la temperatura de estos, el set point del baño es de 21°C, manteniendo los transductores de presión en un rango de temperatura entre 20 y 30°C, temperatura que depende de la temperatura de los gases de escape. Una vez se encienda el baño térmico y llegue a su set point, la instalación está lista para utilizarse.

### **Encendido del motor y posicionamiento del régimen de giro a trabajar.**

Teniendo todos los equipos conectados y el sistema de control en funcionamiento, se enciende el motor y en la interfaz de usuario se controlan las rpm que se trabajaran para dicha prueba, para alcanzar las rpm establecidas de trabajo se acelera el motor en pasos de 0.1 hasta llegar al valor de trabajo. Una imagen de la interfaz se muestra en la Figura 3.13. Para este trabajo de investigación se establece un régimen de giro de 1000 rpm para todos los ensayos, el cual fue seleccionado debido a que es el régimen en el que el motor trabaja más estable. Del mismo modo el sistema de refrigeración con el que cuenta la instalación no es el más adecuado, lo que provoca que al aumentar las rpm el ambiente se caliente demasiado y el tiempo de trabajo del motor disminuya.

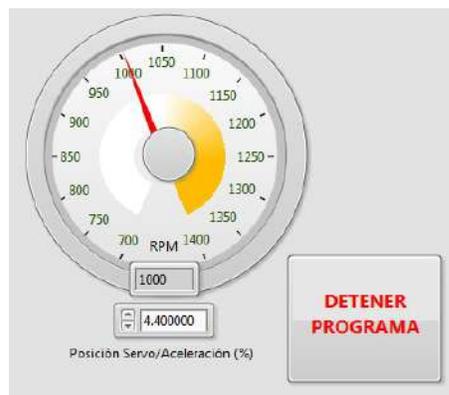


Figura 3.13: Control del régimen de giro.

Para determinar el tiempo de prueba en el motor por cada ensayo se realizan dos pruebas preliminares con el diésel de referencia a 1000 y 1250 rpm, esto con el fin de verificar el tiempo en el cual se cuasi-estabilizan las emisiones contaminantes, en especial los  $\text{NO}_x$ . Bajo esta prueba se estableció un tiempo de trabajo preliminar de 50 minutos para iniciar con el muestreo de las emisiones contaminantes, donde se deja trabajando el motor.

En la Figura 3.14 se muestra la línea de tiempo establecida para cada uno de los ensayos de las mezclas a evaluar, como se puede ver para cada una de las mezclas se realizaran 3 mediciones como se mencionó anteriormente. El tiempo entre cada prueba se toma debido a que se debe abrir otro archivo en el software Maha Emission Viewer y se hace puesta a cero nuevamente.

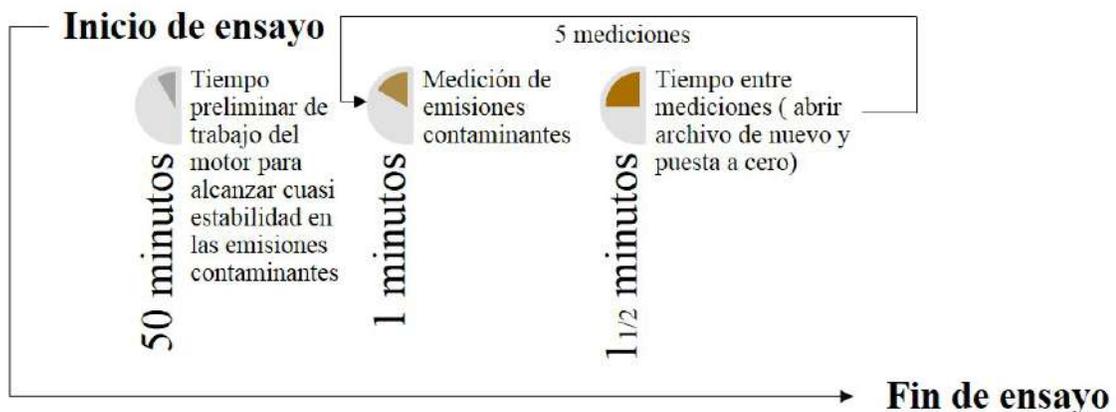


Figura 3.14: Línea de tiempo de ensayos.

**Encendido del analizador de gases combinado MET 6.3 y realización de la prueba de estanqueidad en el software Maha Emission.** Al encender el analizador de gases combinado MET 6.3, en la pantalla del equipo aparece un mensaje de "Inicialización" por aproximadamente 10 minutos. Luego de este tiempo el mensaje cambia a "Calentando", una vez el analizador deja de sonar y pasa su periodo de calentamiento que demora de 2 a 4 minutos, está listo para iniciar la prueba de estanqueidad, prueba que se debe hacer una vez al día.

La prueba de estanqueidad se realiza en el software Maha Emission, se abre dicho archivo y aparece la interfaz como se muestra en la Figura 3.15, seleccionar diésel y ahí ya el programa procede a hacer la prueba de estanqueidad, es importante revisar que la válvula se encuentre abierta en la entrada de aire, para que el programa pueda terminar la prueba con éxito.



Figura 3.15: Interfaz Software Maha Emission.

Una vez el software indica que la prueba ya está realizada, damos ESC, en el cuadro de texto que se abre de finalizar programa se selecciona Si para salir.

**Selección de las variables a medir en el software Maha Emission Viewer y puesta a cero.** Una vez ya se haya realizado la prueba de estanqueidad, se abre el software Maha Emission Viewer por medio del cual se indica al equipo las variables a medir, se realiza la puesta a cero y se inicia la medición. Una vez abierta la interfaz se da click en el icono que marca el número 1 en la Figura 3.16, se abre una pestaña y es ahí donde se seleccionan las variables a medir. Para esta experimentación se seleccionaran las variables CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, RPM, Tem. Aceite y PM Max. como se muestra en la Figura 3.17, ya seleccionadas las variables se oprime OK y se cierra la pestaña.

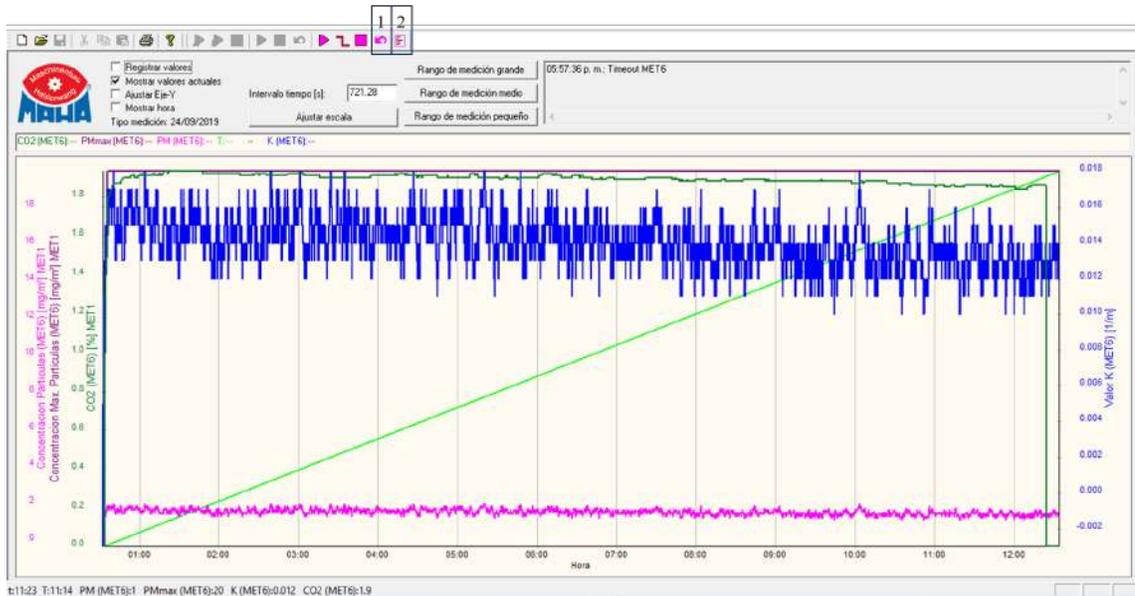


Figura 3.16: Interfaz Software Maha Emission Viewer.

Para realizar la puesta a cero se da click en el icono que marca el número 2 en la Figura 3.16, el software en automático inicia con la puesta a cero y en el recuadro del lado derecho indicará cuando ya esté finalizada. Una vez finalizada la puesta a cero ya está listo el analizador para iniciar con la medición.

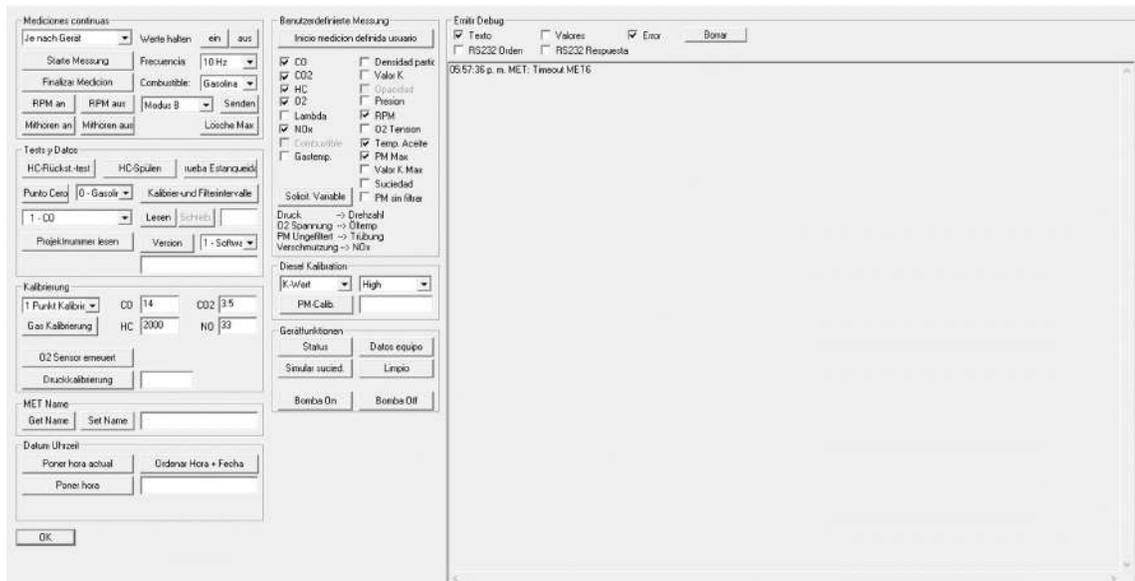


Figura 3.17: Pestaña de selección de variable a medir en el software Maha Emission Viewer.

**Inicio de la prueba.**

Antes de iniciar con el ensayo, se debe tener en cuenta que la válvula se encuentre abierta donde está conectada la sonda del analizador de gases, ya verificado el posicionamiento de la válvula y estando el motor a las rpm establecidas para la prueba, se inicia la primer medición, es importante mencionar que para la primer medición de emisiones contaminantes ya debe haber transcurrido el tiempo preliminar de funcionamiento del motor para tener las mediciones de valores cuasi-estables en todos los gases.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

---

*En esta sección se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de las mezclas binarias y ternarias, las curvas de destilación, el valor de densidad, viscosidad, índice de cetano y poder calorífico. Del mismo modo se muestran los resultados de las emisiones contaminantes de cada una de las mezclas, los valores de CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> y PM*

Los resultados obtenidos de la presente investigación se muestran a continuación, iniciando con la presentación de los valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica de las mezclas a evaluar y se realiza una comparación con las propiedades del diésel de referencia. Luego se muestran los resultados de las emisiones contaminantes de cada una de las mezclas.

## 4.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE MEZCLAS BINARIAS Y TERNARIAS

La evaluación precisa de las propiedades de las mezclas de combustibles es de gran importancia para predecir el buen funcionamiento de los mismos en un motor diésel. Cada una de las propiedades se ve afectada con relación al tipo y la cantidad de combustible mezclado.

Cada una de las mezclas binarias y ternarias se analizan con el objetivo de verificar si cumple con los estándares en los parámetros de curvas de destilación, densidad, viscosidad, índice de cetano y poder calorífico. Los resultados de cada una de las propiedades se describen a continuación, de la misma manera sus valores son reportados en los Apéndices A y B.

Se obtienen las curvas de destilación para todas las mezclas binarias y ternarias. Estas curvas dan información relacionada con la temperatura de destilación y su valor permite determinar el número de cetano. Se registraron los puntos inicial (IBP) y final (FBP) de ebullición, las temperaturas de destilación en porcentajes de múltiplos de 5, el volumen total recuperado, el volumen de residuo que quedaba en el matraz y la presión barométrica que prevaleció durante el proceso de destilación, finalmente se realiza la corrección de las temperaturas observadas, así como también el volumen de pérdidas.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran las curvas de destilación de las mezclas bi-

narias, las cuales reflejan la presencia de cada uno de los combustibles mezclados en diferentes proporciones, en las dos figuras se evidencia un aumento en las temperaturas de destilación conforme se aumenta el porcentaje de los combustibles mezclados, porcentaje que tanto para el biodiésel como para el aceite ligero fue de un máximo del 20 %. Es importante destacar que una mayor temperatura de destilación, mejora la eficiencia de combustión y por lo tanto el rendimiento del motor.

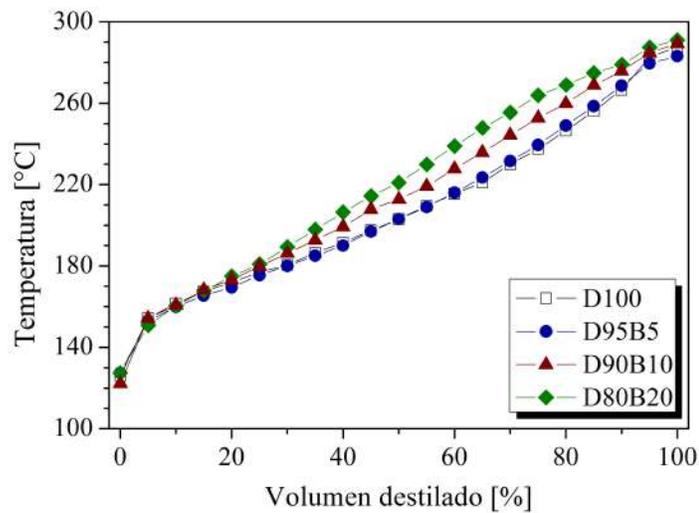


Figura 4.1: Curva de destilación de las mezclas binarias diésel-biodiésel.

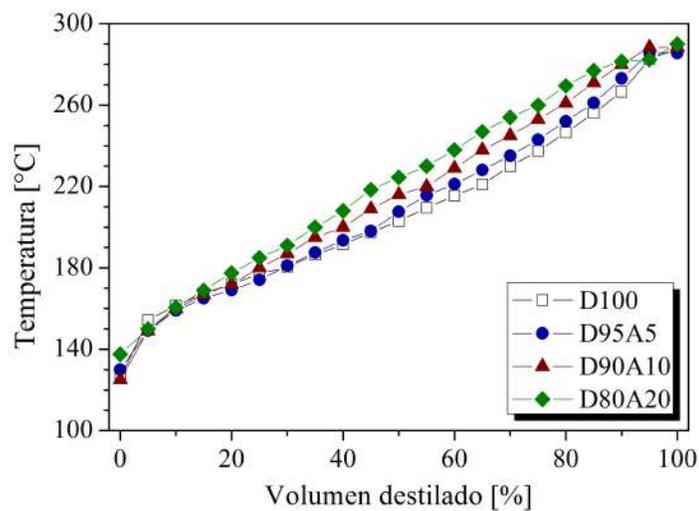


Figura 4.2: Curva de destilación de las mezclas binarias diésel-aceite ligero.

En las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran las curvas de destilación de las mezclas ternarias tomando como base un porcentaje de biodiésel añadido de 5, 10 y 15 % y una variación de porcentaje del aceite ligero de 5, 10 y 20 %, respectivamente. En cada una de las curvas podemos observar que a medida que aumentamos el porcentaje de participación de aceite ligero para un mismo porcentaje de biodiésel sus temperaturas de destilación aumentan y de la misma manera sucede al aumentar el porcentaje de biodiésel.

Los componentes más livianos son los primeros en destilar, debido a su baja temperatura de destilación. Cuanto mayor es la proporción de biodiésel en la mezcla, mayores son las temperaturas de destilación de esta, siguiendo la tendencia de la curva del biodiésel. Todas las curvas binarias y ternarias tienen un punto final de ebullición (FBP) entre 280 y 290 °C.

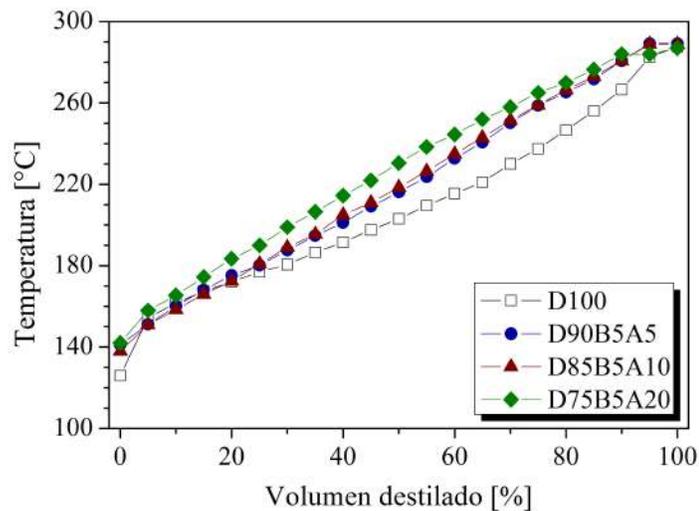


Figura 4.3: Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 5 %.

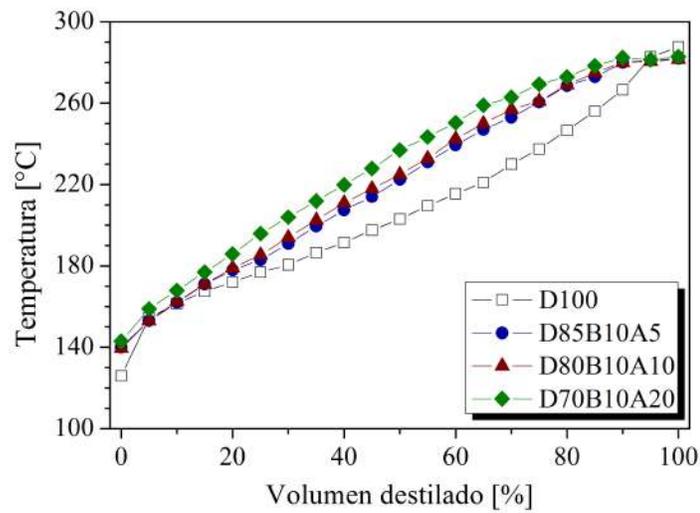


Figura 4.4: Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 10 %.

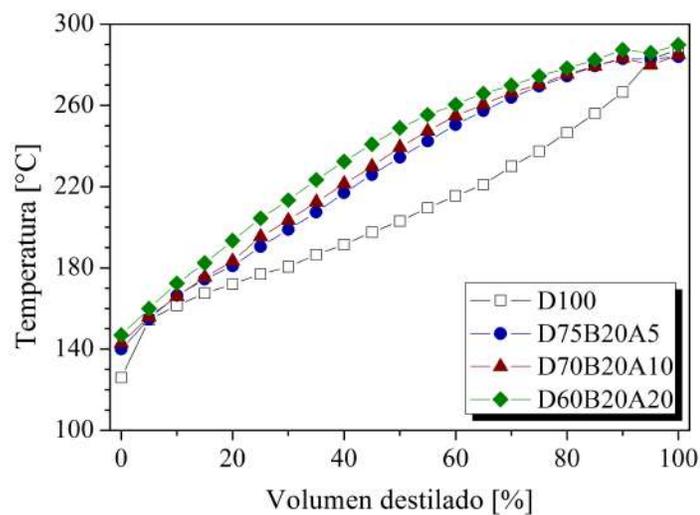
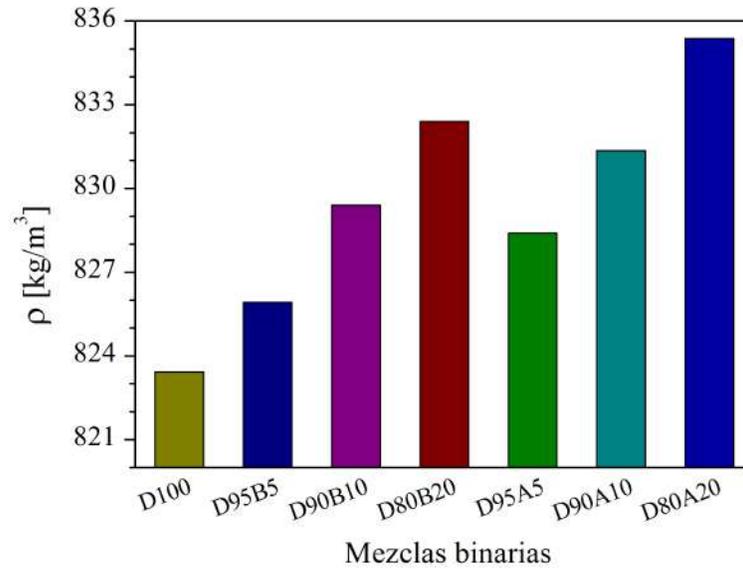


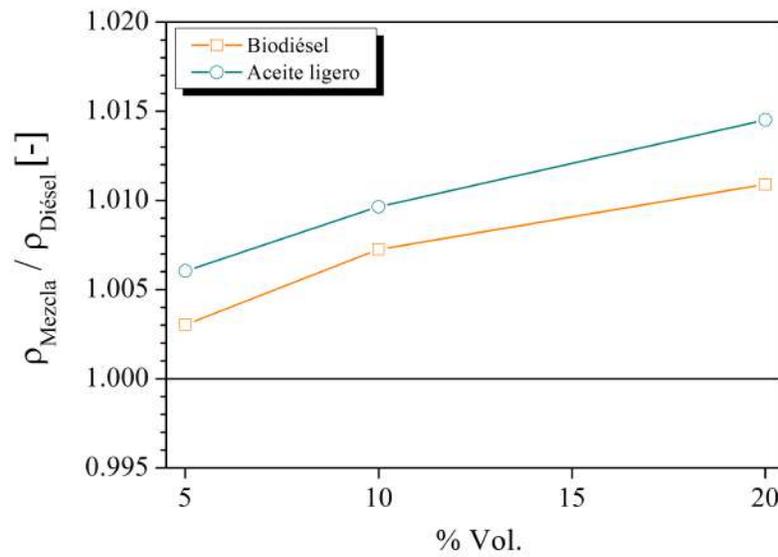
Figura 4.5: Curva de destilación de las mezclas ternarias con un porcentaje de biodiésel del 20 %.

La densidad es un parámetro muy importante, ya que los sistemas de inyección, las bombas y los inyectores deben suministrar la cantidad de diésel ajustada con precisión para proporcionar una combustión adecuada. Para el caso del biodiésel la

densidad está relacionada con el tipo de materia prima y los pasos de purificación que se apliquen. En esta investigación, los valores oscilan entre 822 y 835 kg/m<sup>3</sup> para las mezclas binarias.



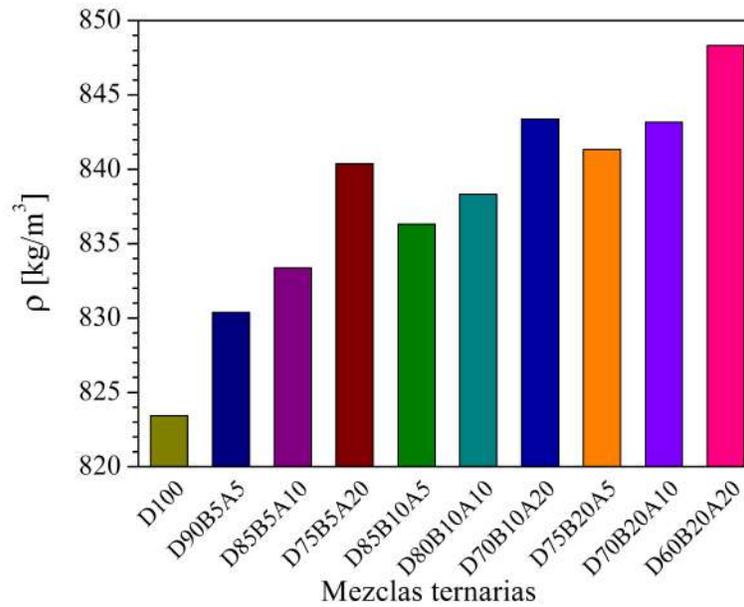
(a)



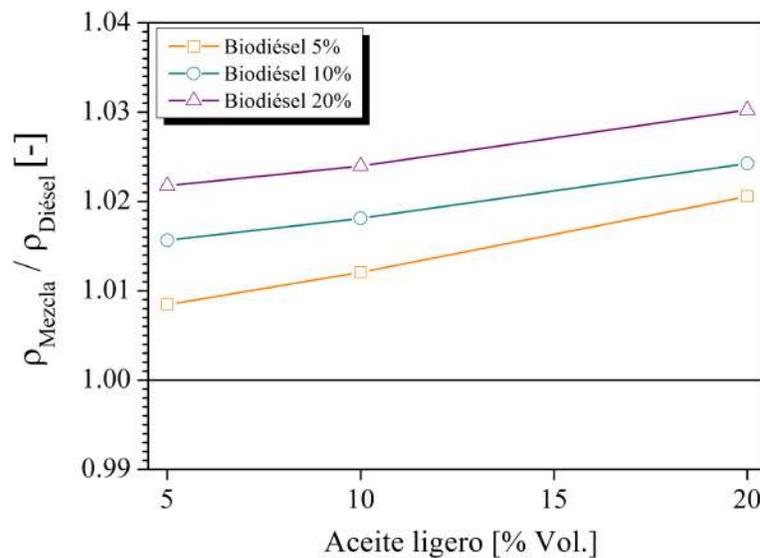
(b)

Figura 4.6: Densidad @ 15°C de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

Como se muestra en el inciso a) de la Figura 4.6, si se compara cada uno de los valores obtenidos de las mezclas, se puede observar que la mezcla con mayor valor de densidad en las mezclas binarias es la D80A20, alejándose del valor del diésel de referencia en un 1.5 % como se muestra en el inciso b) de la Figura 4.6.



(a)



(b)

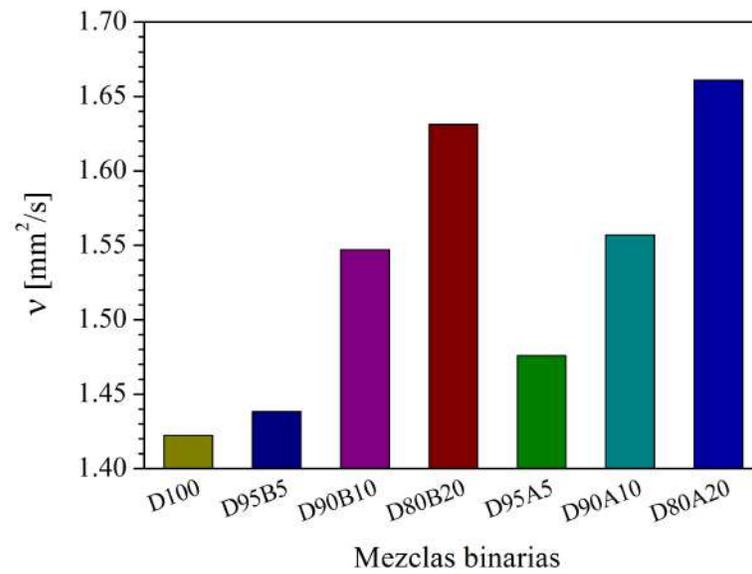
Figura 4.7: Densidad @ 15°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

Los valores de densidad de las mezclas ternarias están entre 830 y 848 kg/m<sup>3</sup>. La mezcla ternaria con mayor valor de densidad es la D60B20A20 como se observa en la Figura 4.7, alejándose del valor del diésel de referencia en aproximadamente 3 % como se muestra en el inciso b de la Figura 4.7.

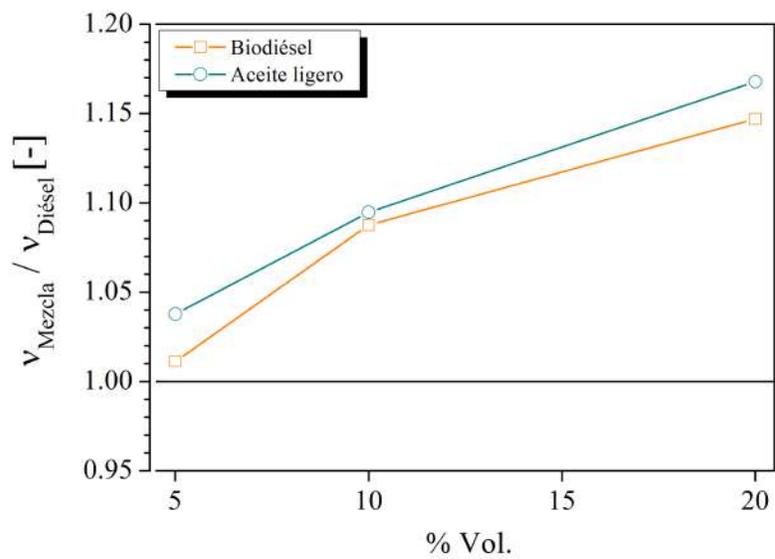
Los estándares indican que los valores de densidad deben estar entre 820 y 845 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, las mezclas binarias y ternarias propuestas pueden usarse, con excepción de la mezcla ternaria D60B20A20. Sin embargo, debido a que el valor no excede en un alto porcentaje el máximo valor de densidad para el diésel, se decide medir sus emisiones contaminantes.

La viscosidad es un parámetro que influye en la emisión de contaminantes. Además, afecta las cualidades requeridas para la lubricación ya que indica la resistencia del líquido al flujo. Por lo tanto, un combustible con un alto valor de viscosidad no fluye fácilmente causando daños al motor o al sistema de combustible. Mientras que un diésel con un bajo valor de viscosidad puede no proporcionar una lubricación adecuada a émbolos, barriles e inyectores.

La viscosidad del combustible diésel se especifica normalmente a 40°C y los combustibles con viscosidades superiores a 4,5 mm<sup>2</sup>/s @ 40°C no son adecuados para su uso en motores diésel. Para todas las mezclas binarias y ternarias los valores de viscosidad cinemática se encuentran entre 1.42 y 1.66 para las mezclas binarias y entre 1.55 y 2.15 para las mezclas ternarias. En las Figuras 4.8 y 4.9 se observan los valores netos y adimensionalizados con respecto al diésel de referencia de las viscosidades de las mezclas binarias y ternarias, respectivamente.

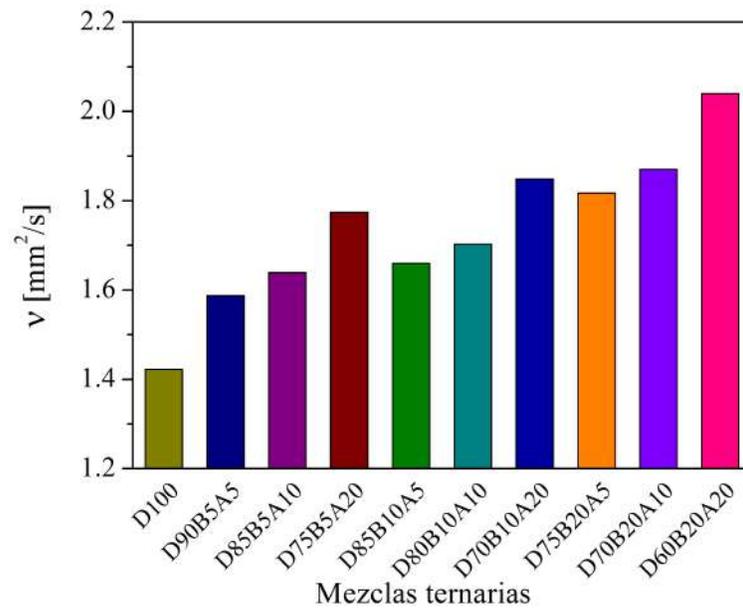


(a)

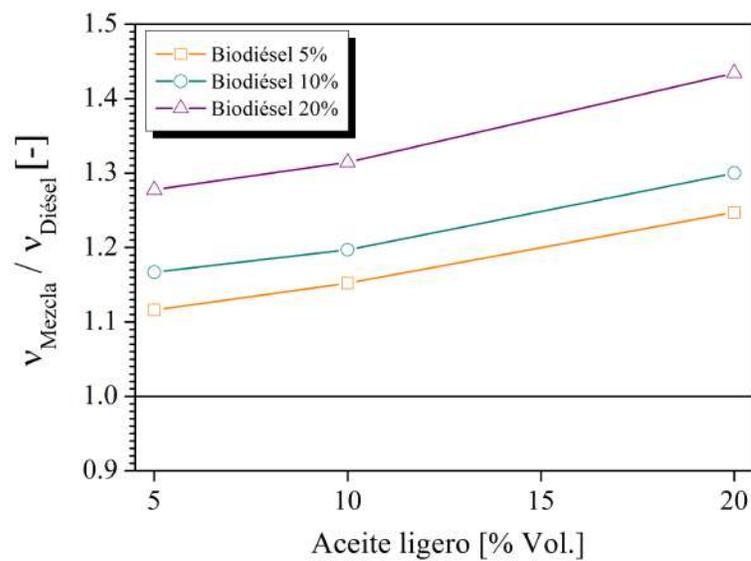


(b)

Figura 4.8: Viscosidad @ 40°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.



(a)

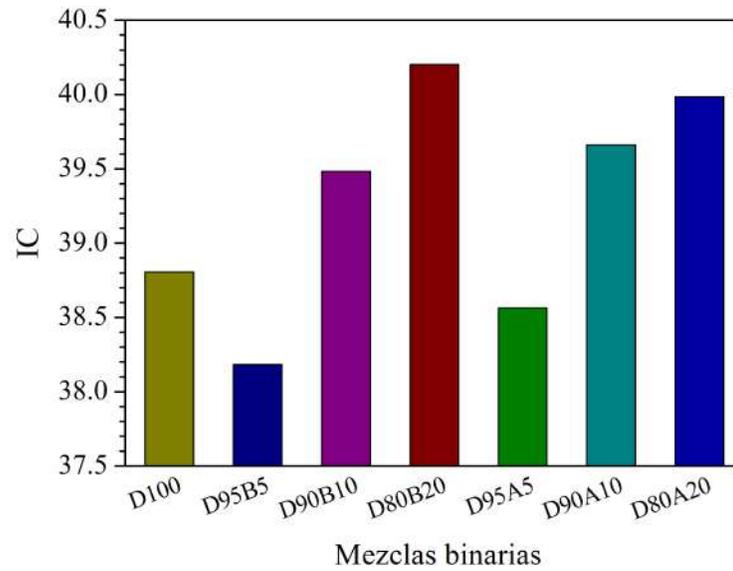


(b)

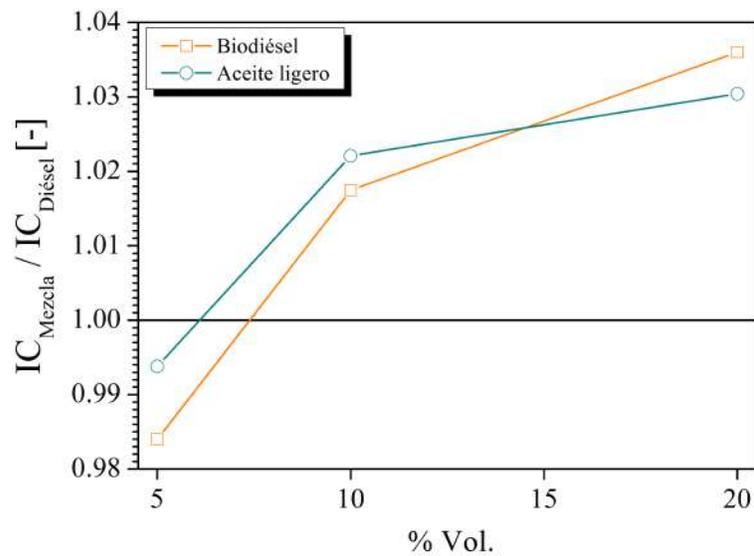
Figura 4.9: Viscosidad @ 40°C de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

El índice de cetano mide el retraso de ignición de un combustible diésel. Este valor aumenta cuando disminuye el intervalo entre el momento en que se inyecta el combustible y el momento en que comienza a arder. En un diésel, es más deseable

la presencia de hidrocarburos que se encienden fácilmente, tales como: parafinas, olefinas, naftenos, isoparafinas y aromáticos.



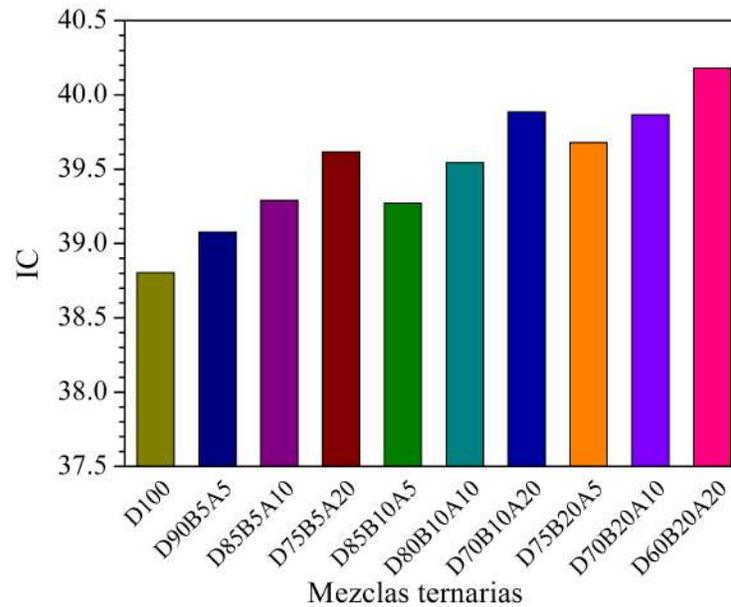
(a)



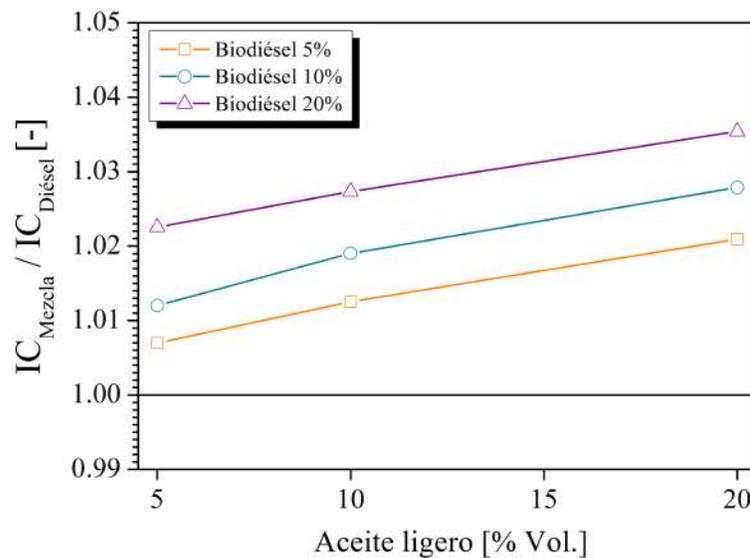
(b)

Figura 4.10: Índice de Cetano de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

El retraso del encendido puede causar dificultades de arranque, bajo consumo de combustible, pérdida de potencia y daños en el motor. La mezcla de los combustibles biodiésel y aceite ligero en algunos casos ocasionó una disminución en el valor, aunque esto sucede sólo para las mezclas de 5% de cada uno de los combustibles.



(a)



(b)

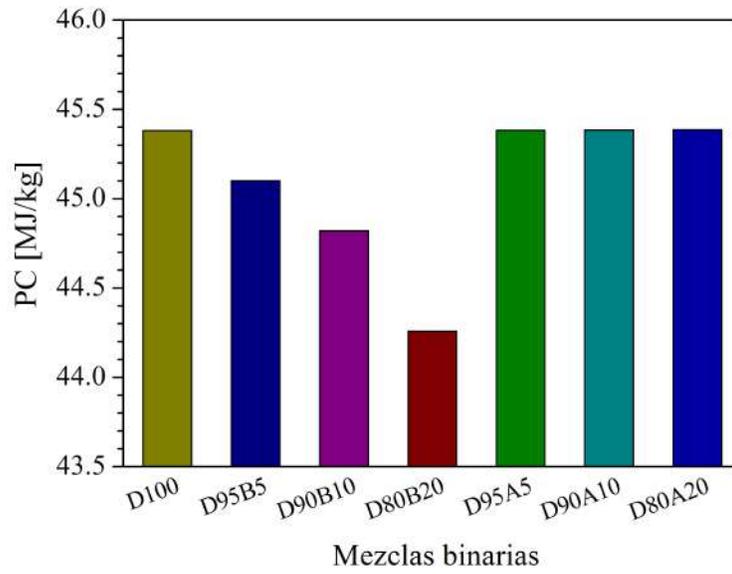
Figura 4.11: Índice de Cetano de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

La mezcla D80B20 tiene el mayor IC, con una diferencia del 3.5 % aproximadamente respecto al diésel como se observa en el inciso b) de la Figura 4.10. Los valores brutos de cada uno de las mezclas binarias se muestran en el inciso a) de la Figura 4.10, donde se puede ver que a medida que aumentamos el porcentaje de cada uno de los combustibles el IC aumenta.

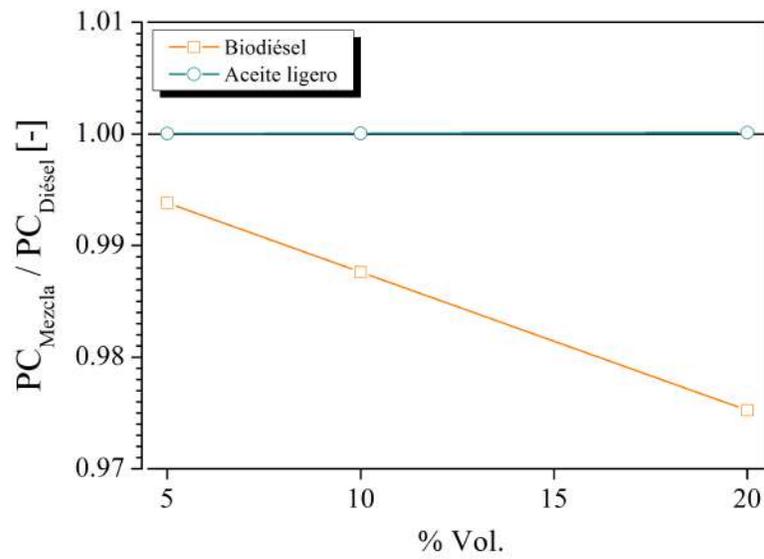
La mezclas ternarias con mayor IC es la D60B20A20, con un valor de 40.02, valor mayor al diésel de referencia de un 3.6 %. Los valores brutos de cada uno de las mezclas ternarias se muestran en el inciso a) de la Figura 4.11, donde se puede ver que a medida que aumentamos el porcentaje de cada uno de los combustibles el IC aumenta.

El poder calorífico del combustible identifica el contenido energético específico que éste contiene. El poder calorífico del biodiésel es menor que el del combustible diésel, lo que provoca que el combustible mezclado con biodiésel disminuya el poder calorífico como se puede observar para las mezclas binarias en la Figura 4.12 y para las mezclas ternarias en la Figura 4.13.

Un menor poder calorífico de las mezclas conducirá a una caída de potencia y par del motor diésel. Por lo tanto, la duración de la inyección se amplifica y se debe inyectar más combustible para mantener una mayor potencia de salida. El poder calorífico de las mezclas binarias y ternarias se encuentra entre los valores de 44 y 45.5 MJ/kg. Aunque la participación de biodiésel en las mezclas hace que disminuya el poder calorífico, la diferencia al valor más alto con respecto al diésel de referencia para las mezclas binarias es de 2.5 % para la mezcla D80B20 como se muestra en el inciso b) de la Figura 4.12 y de 2.4 % para la mezcla ternaria D60B20A20 como se observa en el inciso b) de la Figura 4.13.

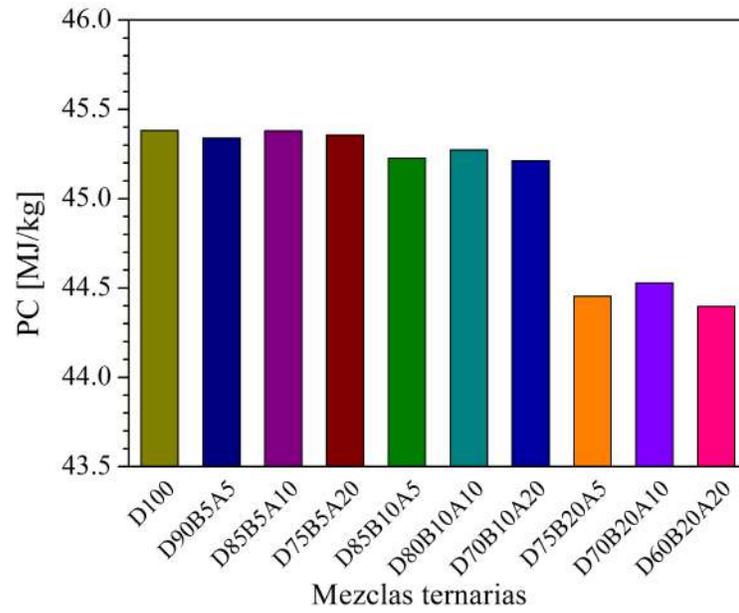


(a)

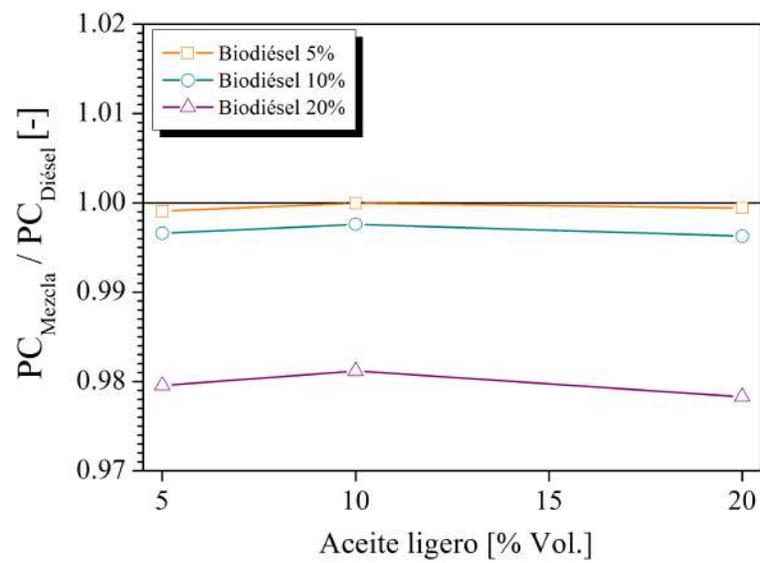


(b)

Figura 4.12: Poder calorífico de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.



(a)



(b)

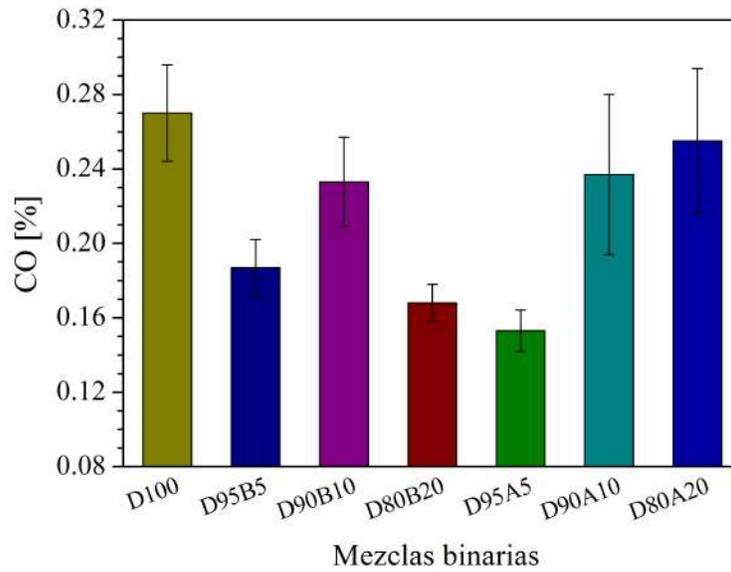
Figura 4.13: Poder calorífico de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para  
 a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

## 4.2 EMISIONES CONTAMINANTES DE MEZCLAS BINARIAS Y TERNARIAS

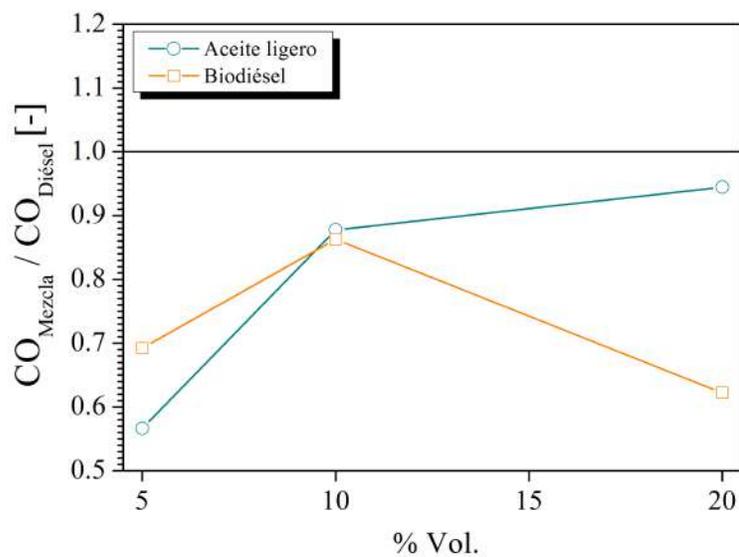
Las emisiones contaminantes que se midieron en la presente investigación para cada una de las mezclas binarias y ternarias definidas son CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y PM. Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron 5 mediciones durante un tiempo de 1 minuto para cada una de las mezclas, de las cuales se calculó un promedio ponderado y dicho valor es el publicado. El analizador utilizado realiza la medición simultáneamente cada una de las emisiones reportadas.

Se trabajó con el motor en todas las pruebas a 1000 rpm sin carga, la potencia y el consumo específico de combustibles no son medidos en la experimentación. Es importante mencionar que se monitoreó la temperatura del aceite en cada una de las mediciones con el fin de tomarlas a la misma temperatura, que para este caso estuvo en el rango de 86 a 88 °C.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran el efecto sobre las emisiones de CO del diésel mezclado con biodiésel y aceite ligero en mezclas binarias, de igual manera en mezclas ternarias. La formación de monóxido de carbono depende del contenido de oxígeno y la temperatura de combustión [53], así que una combustión con un suministro inadecuado de oxígeno da como resultado la producción de monóxido de carbono. La Figura 4.14 (a) representa los valores brutos de emisión de CO del diésel puro y de las mezclas binarias. Los valores de CO para las mezclas D95B5, D90B10, D80B20, D95A5, D90A10, D80A20 y D100 a 1000 rpm son de 0.187 % 0.233 % 0.168 % 0.153 % 0.2370 % 0.2550 % y 0.270 % respectivamente. Tomando como referencia el valor del diésel puro, las mezclas D90A5, D95B5 y D80B20 son las que menos monóxido emiten al ambiente, lo que equivale en porcentaje al 57 %, 69 % y 62 % respectivamente, del valor del diésel.



(a)



(b)

Figura 4.14: CO de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

En la Figura 4.14 (b) se puede observar cómo afecta la mezcla de biodiésel y aceite ligero en las emisiones contaminantes, para el caso del biodiésel la línea de tendencia muestra que al adicionar biodiésel al diésel ocasiona que el CO disminuya, resultados

que coinciden con la literatura donde informan que las emisiones de monóxido de carbono de mezclas con biodiésel son menores debido a la presencia de oxígeno extra en las moléculas de biodiésel [54].

Para el caso del aceite ligero se puede observar que su adición como mezcla de igual manera que el biodiésel reduce la emisión de CO del diésel puro, aunque éste en menor medida, ya que si se observa la línea de tendencia se puede ver que a medida que se aumenta el porcentaje de aceite ligero el valor del monóxido se acerca más al valor del diésel, esto debido a que el aceite ligero es un fluido nafténico, compuesto de carbonos e hidrógenos al igual que el diésel y no es un compuesto oxigenado como el biodiésel.

La Figura 4.15 (a) representa los valores brutos de emisión de CO de las mezclas ternarias. Los valores de CO para las mezclas D90B5A5, D85B5A10, D75B5A20, D85B10A, D80B10A10, D70B10A20, D75B20A5, D70B20A10, D60B20A20 a 1000 rpm son de 0.197 %, 0.207 %, 0.236 %, 0.195 %, 0.227 %, 0.214 %, 0.208 %, 0.250 %, 0.254 %, respectivamente.

En la Figura 4.15 (b) se puede observar cómo afecta la mezcla de biodiésel y aceite ligero en las emisiones contaminantes ya como mezcla ternaria. Como se puede ver los valores bajos de CO corresponden a las mezclas con 5 % de aceite ligero para el 5, 10 y 20 % de biodiésel, a medida que se aumenta la participación de aceite ligero en la mezcla para el 10 % y 20 % de biodiésel se puede observar que el monóxido de carbono aumenta con respecto a los valores más bajos que corresponden a las mezclas D90B5A5, D85B10A5 y D75B20A5.

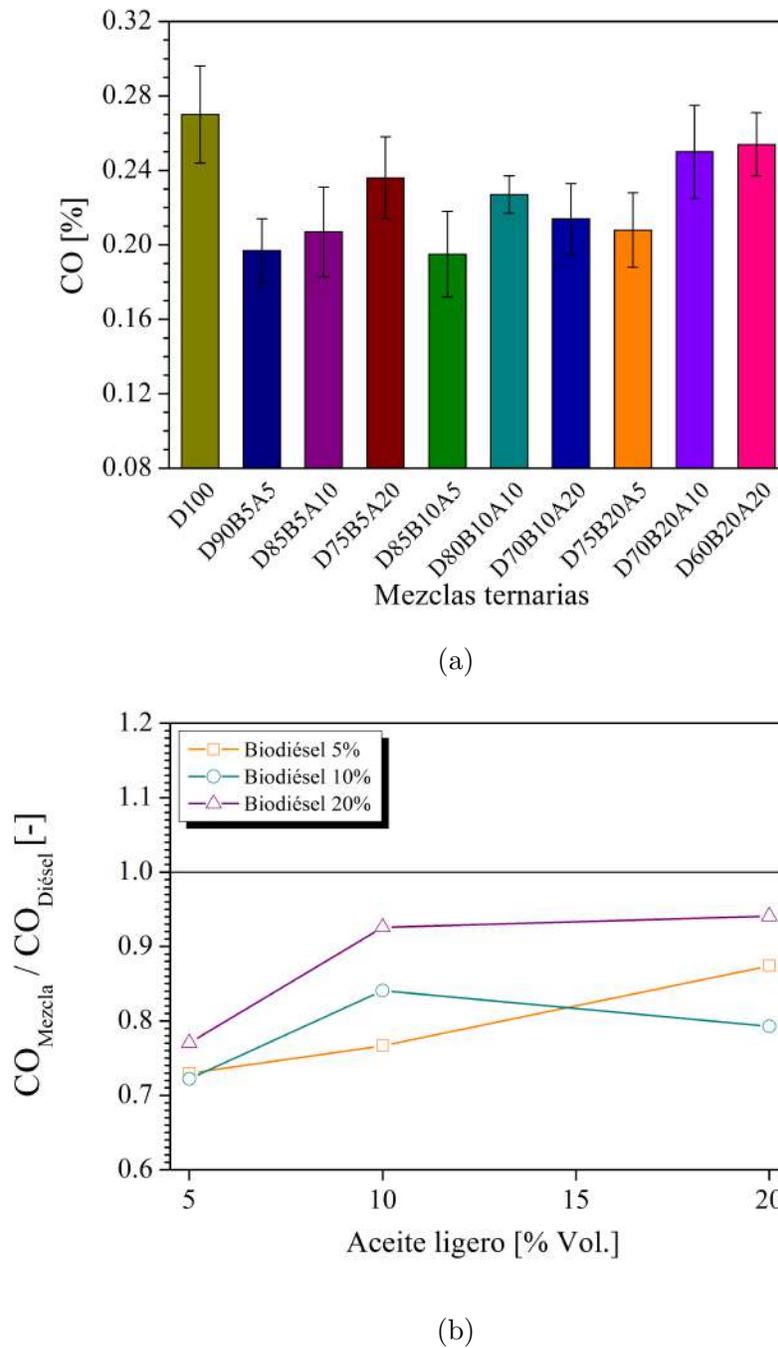
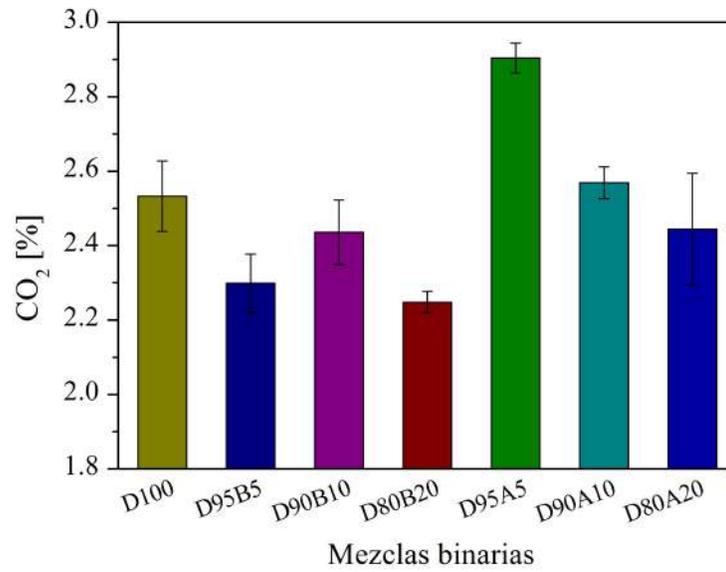


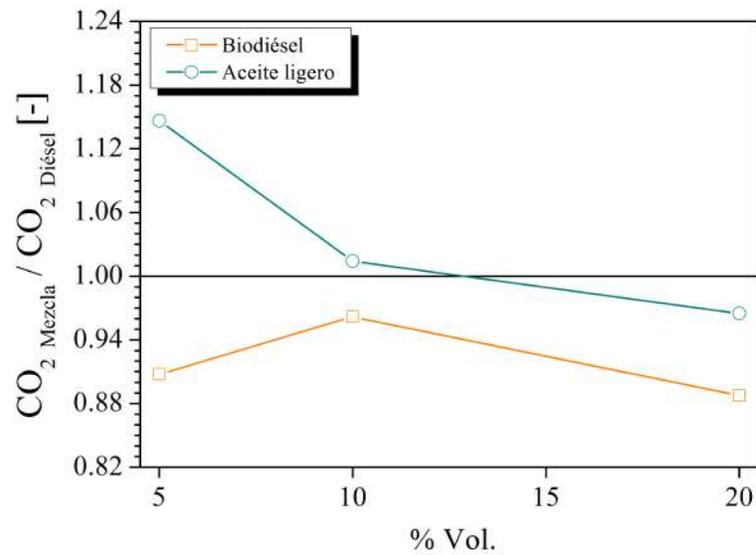
Figura 4.15: CO de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

Es importante resaltar que en cuestión de mezcla ternaria al mezclar el biodiésel y el aceite ligero con el diésel, el aceite ligero es el que tiene mayor impacto en la formación de CO, ya que a medida que aumentamos su porcentaje éste aumenta la

cantidad de monóxido. Sin embargo, todas las mezclas ternarias se encuentran más bajas que el combustible diésel puro.



(a)



(b)

Figura 4.16: CO<sub>2</sub> de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

La emisión de CO<sub>2</sub> es el resultado de la combustión completa del combustible.

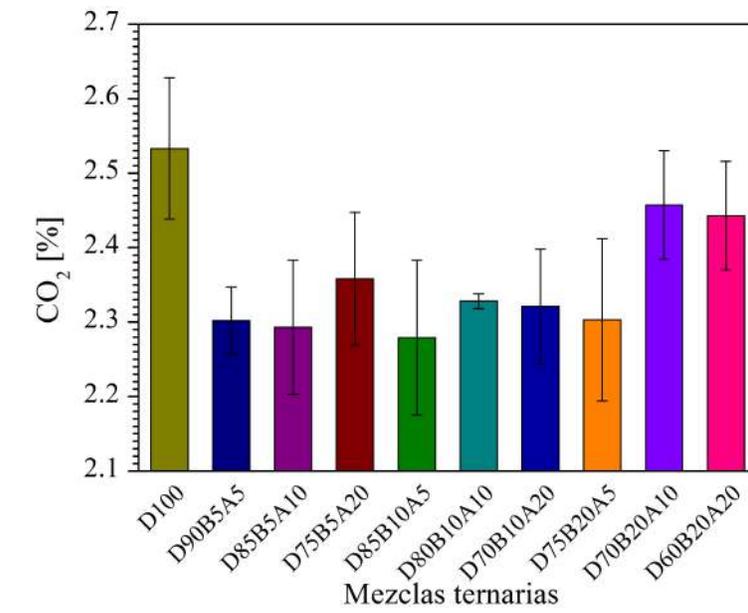
La Figura 4.16 (a) representa los valores brutos de emisión de  $\text{CO}_2$  del diésel puro y de las mezclas binarias. Los valores de dióxido de carbono para las mezclas D95B5, D90B10, D80B20, D95A5, D90A10, D80A20 y D100 a 1000 rpm son de 2.299 %, 2.436 %, 2.248 %, 2.904 %, 2.569 %, 2.444 % y 2.533 %.

Se observa claramente en la Figura 4.16 (b) que los valores de dióxido de carbono que emite la mezcla con biodiésel para el 5, 10 y 15 % de participación están dentro de un mismo rango. Los autores K.A. Abed et al. [55] indican menores emisiones de  $\text{CO}_2$  para mezclas de biodiésel de diferentes materias primas en comparación con el aceite ligero, misma tendencia encontrada en esta investigación.

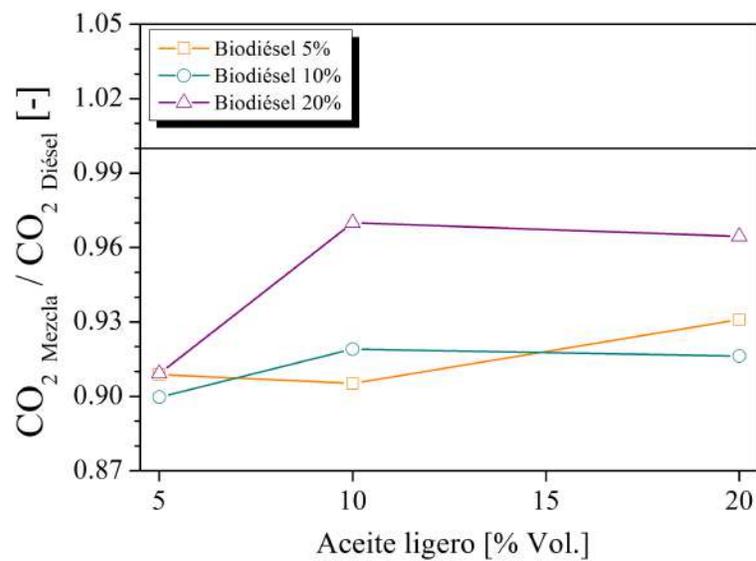
Para el caso del aceite ligero a medida que se aumenta su porcentaje de participación, la cantidad de  $\text{CO}_2$  disminuye, posiblemente como consecuencia de una combustión menos completa al aumentar el porcentaje. No obstante si se hace una comparación con el diésel de referencia y todas las mezclas binarias, cuando se adiciona un 5 % y un 10 % de aceite ligero se tiene valores por encima del valor del diésel, siendo estas las mezclas que mayor cantidad de dióxido de carbono emiten.

La Figura 4.17 (a) representa los valores brutos de emisión de  $\text{CO}_2$  de las mezclas ternarias. Los valores de dióxido de carbono para las mezclas D90B5A5, D85B5A10, D75B5A20, D85B10A5, D80B10A10, D70B10A20, D75B20A5, D70B20A10, D60B20A20 a 1000 rpm son de 2.302 %, 2.293 %, 2.358 %, 2.279 %, 2.328 %, 2.321 %, 2.303 %, 2.457 % y 2.443 %.

La Figura 4.17 (b) muestra los valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia, donde se observa que para el 5 y 10 % de biodiésel la adición de aceite ligero no tiene gran impacto, ya que los valores se encuentran muy cercanos, aunque ya para el 20 % de biodiésel el adicionar 10 y 20 % de aceite ligero causa un aumento en el dióxido de carbono, mismo comportamiento que se evidenció para el CO de las mezclas ternarias.



(a)

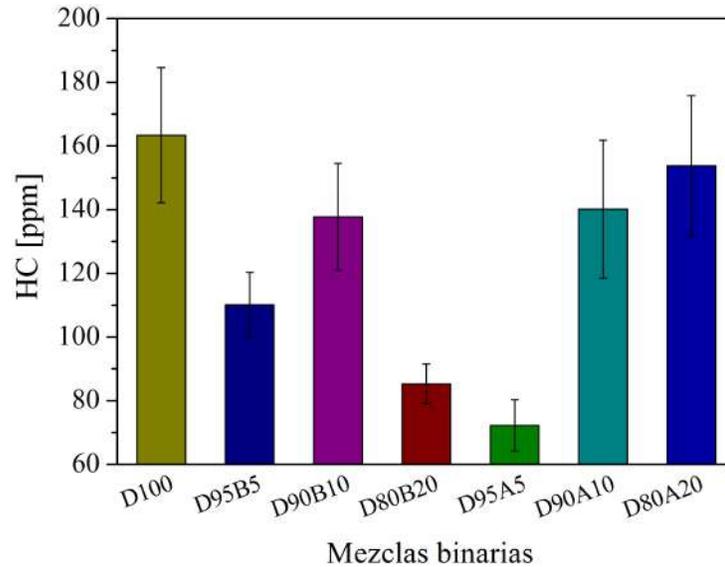


(b)

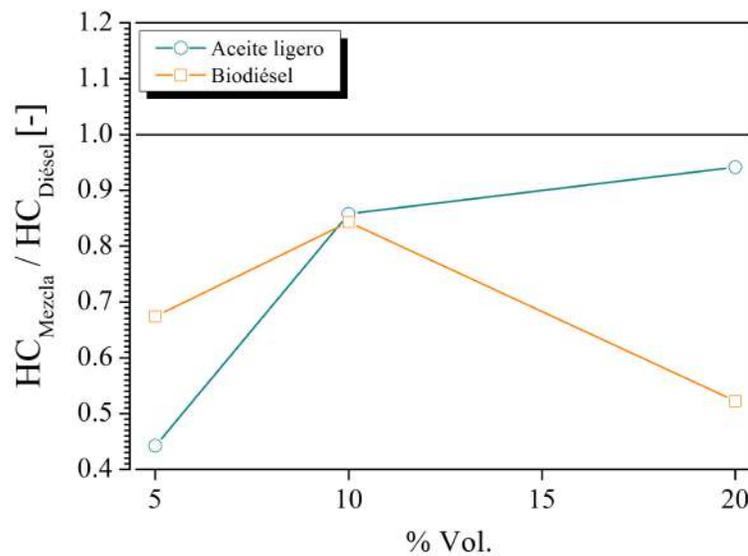
Figura 4.17: CO<sub>2</sub> de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

Las emisiones de HC ocurren cuando una mezcla rica se entrega al cilindro y la mezcla no se quema por completo, los cuales se pueden reducir con un retraso de la ignición asociado con combustibles con un mayor número de cetano [56]. Las Figuras

4.18 y 4.19 muestran los efectos de los combustibles de prueba sobre las emisiones HC. La emisión de HC más alta se obtiene para el diésel puro con un valor de 163 ppm, para las mezclas binarias D95B5, D90B10, D80B20, D95A5, D90A10 y D80A20 los valores de HC son 110, 138, 85, 72, 140, 154 ppm, respectivamente.

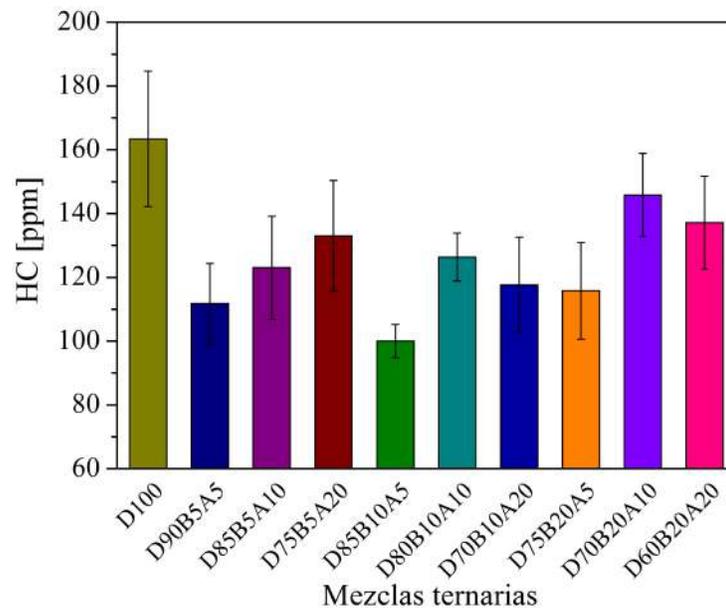


(a)

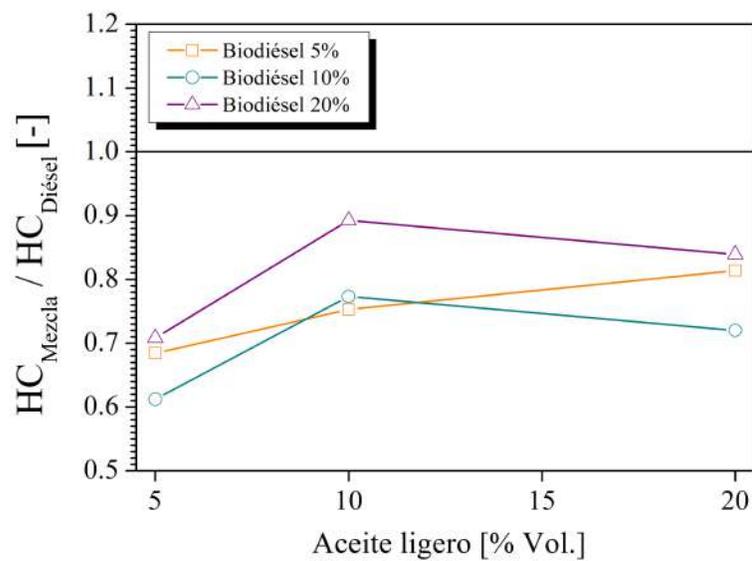


(b)

Figura 4.18: HC de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.



(a)



(b)

Figura 4.19: HC de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

La emisión de HC más baja para las mezclas binarias de obtiene para D95A5, este valor 65 % menos que el diésel, a medida que se aumenta la cantidad de aceite ligero en la mezcla binaria aumenta el porcentaje de hidrocarburos sin quemar, debido a

que por sus característica nafténica necesita de más energía para romper sus enlaces y tener una combustión completa, mientras que para las mezclas con biodiésel ocurre lo contrario ya que por el contenido de oxígeno que tiene la combustión de éste es más completa.

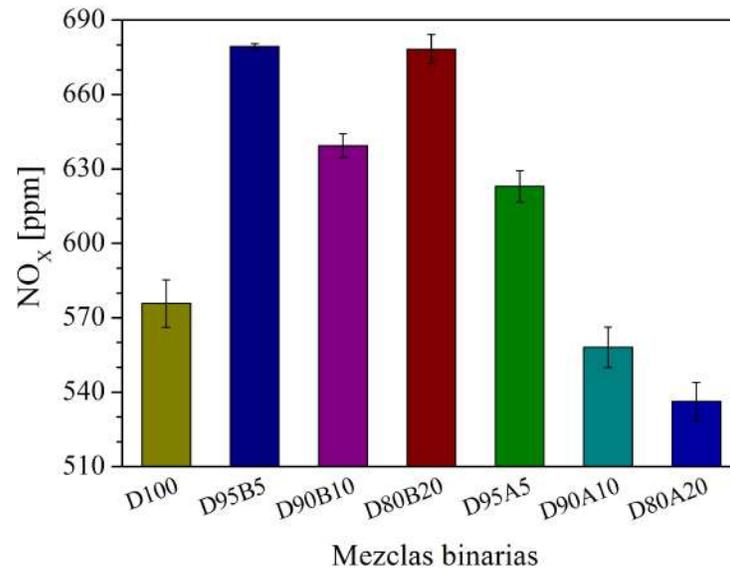
Para las mezclas ternarias ocurre el mismo efecto que en las mezclas binarias de una disminución de HC, para las mezclas D90B5A5, D85B5A10, D75B5A20, D85B10A5, D80B10A10, D70B10A20, D75B20A5, D70B20A10, D60B20A20 los valores de HC a 1000 rpm son 112, 123, 133, 100, 126, 118, 116, 146, 137, respectivamente.

La adición ya sea de biodiésel o de aceite ligero tiene un mismo impacto a la hora de comparar entre las mezclas ternarias, no hay una variación notoria al adicionar el uno o el otro, no obstante todas mezclas disminuyen la cantidad de HC. La mezcla ternaria que menos cantidad de HC sin quemar emite es D80B5A5 con 112 ppm, un 32 % menos que el HC del diésel puro para este estudio.

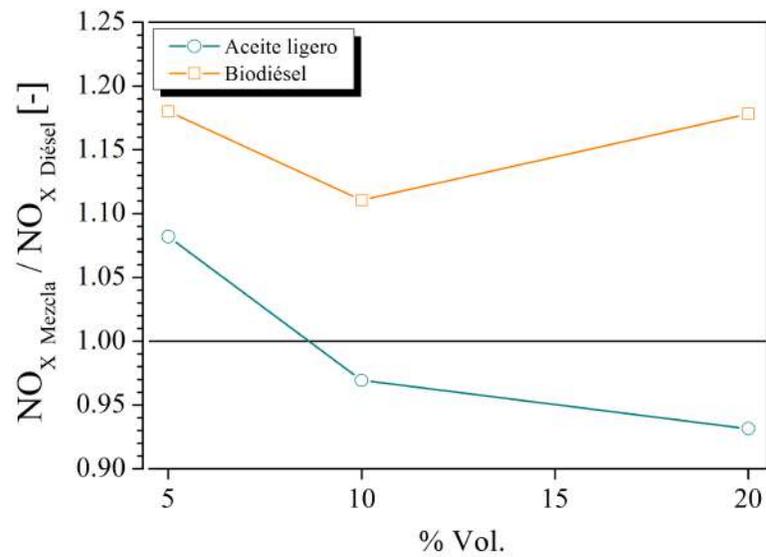
Las emisiones de HC para todas las mezclas probadas son menores con respecto al diésel, como consecuencia de un mayor índice de cetano con respecto al del diésel, lo que permite que el combustible se encienda por adelantado y reduzca la duración para formar mezclas que exceden el límite de inflamabilidad pobre.

La emisiones de óxidos de nitrógeno en una combustión es resultado de la temperatura de combustión en el cilindro, la cual si es aproximadamente superior a 1600 °C, las moléculas de nitrógeno comienzan a participar en la reacción y por lo tanto producen  $\text{NO}_X$  [57].

La variación de las emisiones de óxidos de nitrógeno con respecto a 1000 rpm, para todos los combustibles de prueba, se presentan en las Figuras 4.20 y 4.21. En las mezclas binarias se observan ligeros aumentos en las emisiones  $\text{NO}_X$ , para las mezclas binarias con biodiésel D95B5, D90B10, D80B20 con valores de 679.407, 639.425, 678.355 ppm, respectivamente, esto como consecuencia del alto contenido de oxígeno en el biodiésel, que causa mayores tasas de emisión de  $\text{NO}_X$ .

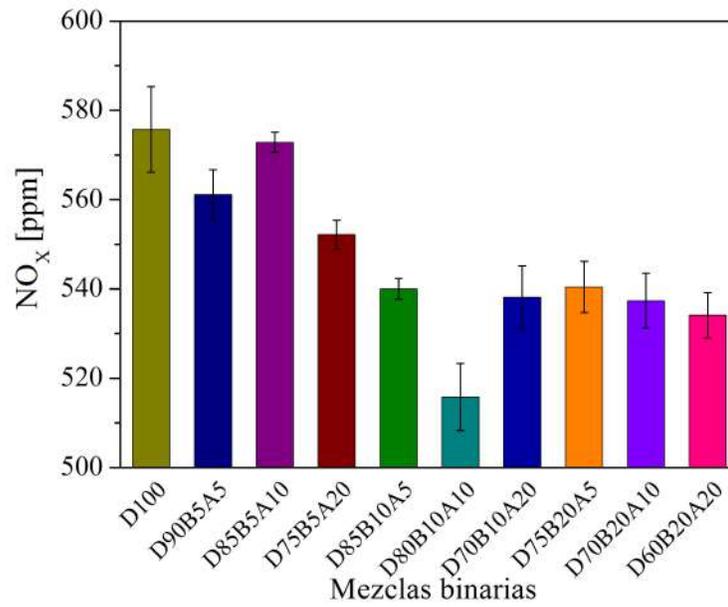


(a)

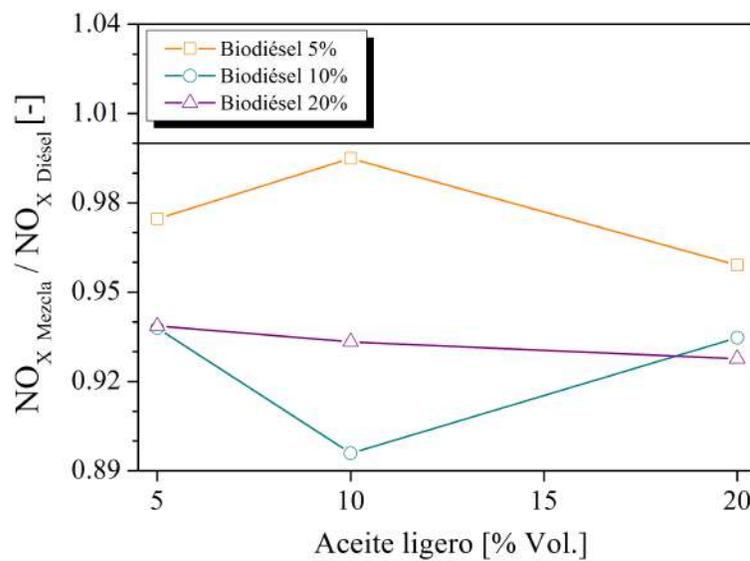


(b)

Figura 4.20: NO<sub>x</sub> de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.



(a)



(b)

Figura 4.21: NO<sub>x</sub> de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

Para las mezclas binarias con aceite ligero D95A5, D90A10, D80A20 los valores son de 622.958, 558.086 y 536.273 ppm, respectivamente, donde se puede observar que a medida que se aumenta la cantidad de participación de este aditivo los óxidos

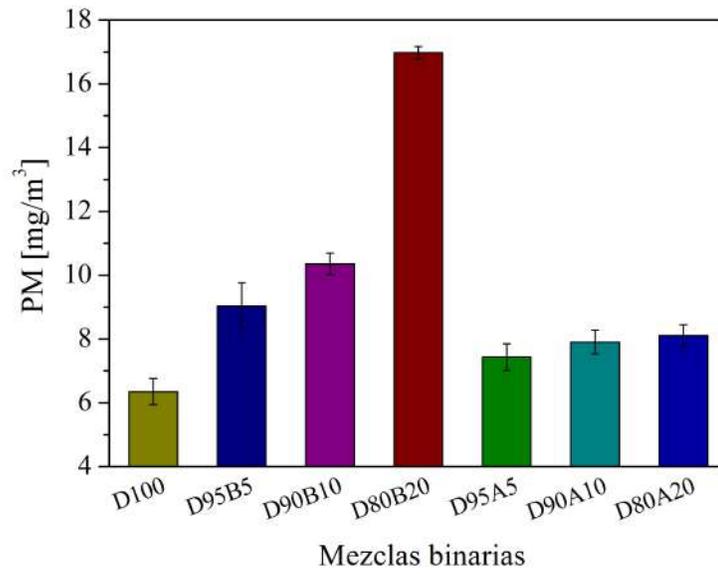
de nitrógeno disminuyen hasta en un 7 % como ve puede observar en la Figura 4.20 (b).

La figura 4.21 muestra que la cantidad de óxidos de nitrógeno fue menor para todas las mezclas ternarias evaluadas para el mismo régimen del motor. Los valores de  $\text{NO}_x$  emitidos por las mezclas D90B5A5, D85B5A10, D75B5A20, D85B10A5, D80B10A10, D70B10A20, D75B20A5, D70B20A10 y D60B20A20 respectivamente son de 561.132, 572.859, 552.163, 540.011, 515.824, 538.175, 540.432, 537.358 y 534.097 ppm.

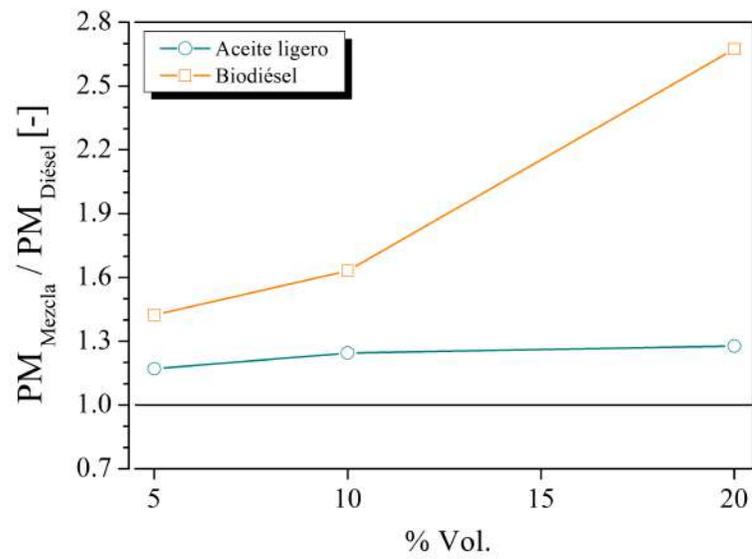
Se observa en la gráfica de valores adimensionalizados para las mezclas ternarias, que la emisión de  $\text{NO}_x$  tiene una tendencia muy particular, al aumentar el porcentaje de aceite ligero para cada cantidad de biodiésel en la mezcla, el aceite ligero provoca una disminución significativa en la cantidad de óxidos de nitrógeno a medida que se aumenta la participación de biodiésel. La mezcla ternaria D80B10A10 tiene la menor emisión de  $\text{NO}_x$ , con una reducción de un 10 % con respecto al valor del diésel puro.

Como se menciona anteriormente, el aceite ligero en las mezclas provoca una disminución significativa en las emisiones de óxidos de nitrógeno, en comparación con el diésel puro, lo que se puede atribuir a que el aditivo estaría acelerando el tiempo de ignición del diésel y reduciendo la cantidad de mezcla en la combustión premezclada, teniendo como resultado la reducción de los  $\text{NO}_x$ . De igual manera es importante mencionar que la formación de  $\text{NO}_x$  no es sólo función de la temperatura de combustión, factores como la geometría del pistón y el combustible juegan un papel vital en su formación [29].

La cantidad de material particulado emitido a la atmósfera es consecuencia de una combinación de parámetros como la velocidad del motor, carga, estrategia de inyección, proceso de combustión y en última instancia del sistema de postratamiento [58]. Considerándose partícula a cualquier material presente en los gases de salida que se encuentre en estado líquido o sólido en condiciones aproximadamente ambientales.

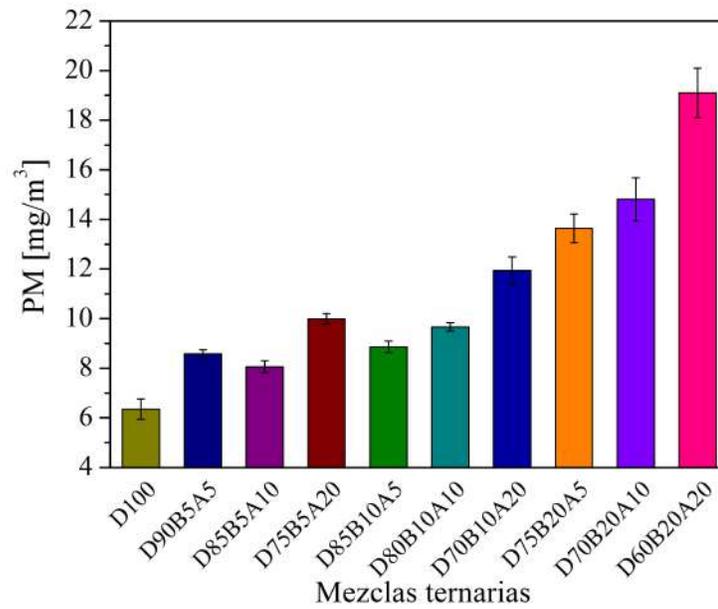


(a)

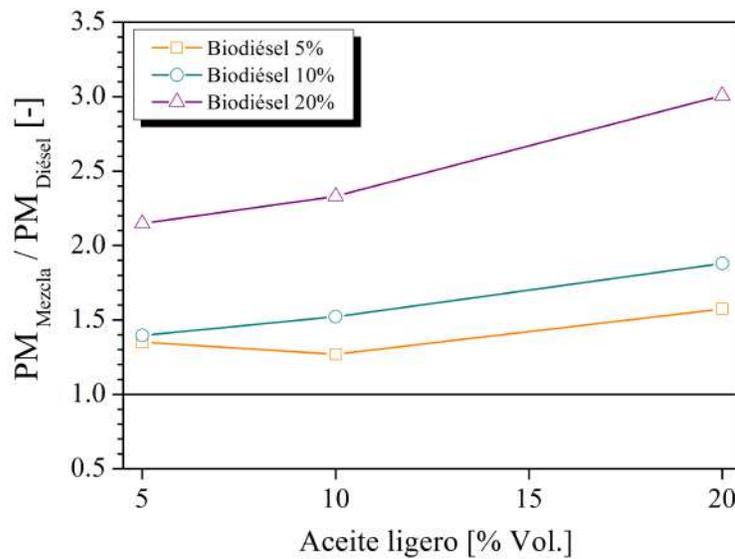


(b)

Figura 4.22: PM de mezclas binarias diésel-biodiésel y diésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.



(a)



(b)

Figura 4.23: PM de mezclas ternarias diésel-biodiésel-aceite ligero para a) Valores netos, b) Valores adimensionalizados respecto al diésel de referencia.

La Figura 4.22 muestra el material particulado para las mezclas binarias, logrando observar que, en comparación con el diésel de referencia, las emisiones de PM para todas las mezclas aumentan en condiciones de velocidad de 1000 rpm y sin

carga en el motor. La concentración de PM de las mezclas binarias D95B5, D90B10, D80B20, D95A5, D90A10 y D80A20 son de 9.042, 10.355, 16.982, 7.433, 7.905 y 8.113 mg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A medida que se aumenta el porcentaje de biodiésel la concentración de material particulado se eleva, donde la mezcla con mayor PM es D80B20, siendo aproximadamente tres veces el valor del diésel puro, para el caso del aceite ligero no hay un notable aumento en las PM.

La Figura 4.23 muestra el material particulado emitido por las mezclas ternarias, las mezclas D90B5A5, D85B5A10, D75B5A20, D85B10A5, D80B10A10, D70B10A20, D75B20A5, D70B20A10 y D60B20A20 emiten una concentración de PM de 8.580, 8.061, 9.996, 8.861, 9.665, 11.938, 13.637, 14.808 y 19.097 gr/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Al igual que en las mezclas binarias se observa que a medida que aumenta el porcentaje de biodiésel el material particulado aumenta en las mezclas binarias, siendo este el que mayor impacto tiene sobre las PM. Como se observa en la Figura 4.23 (b), a medida que se aumenta la cantidad de aceite ligero en las mezclas, éste no impacta significativamente en la concentración de PM como lo hace el biodiésel.

Aunque el material particulado para mezclas con biodiésel según la literatura disminuye al tener más moléculas de oxígeno, se deben realizar más estudios con el fin de realizar una discusión más profunda para el comportamiento encontrado. De igual manera para las mezclas ternarias se pudo observar que los óxidos de nitrógeno disminuían como efecto de la adición del aceite ligero, lo que provocaría un aumento en el material particulado, provocado posiblemente por una mayor duración de la combustión y la reducción de la concentración de oxígeno en la mezcla de aire y combustible o también por una combustión incompleta.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

*En este capítulo se enumeran las conclusiones, basadas en los objetivos trazados y los respectivos resultados de este trabajo de investigación. Del mismo modo la sección finaliza con algunos trabajos futuros propuestos para enriquecer este trabajo.*

## 5.1 CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio consistió en caracterizar fisicoquímicamente y analizar las emisiones contaminantes de mezclas binarias y ternarias entre diésel, biodiésel y aceite ligero, con el fin de evaluar su uso en los motores de encendido por compresión. A continuación se enumeran dichas conclusiones divididas en dos secciones, una sección donde se concluye la caracterización fisicoquímica de las mezclas y una segunda sobre las emisiones contaminantes de las mismas.

### 5.1.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS MEZCLAS

- Los resultados de la caracterización fisicoquímica permiten concluir que todas las mezclas propuestas en este trabajo de investigación pueden ser adecuadas para su uso en motores de encendido por compresión, ya que las propiedades del diésel de referencia mejoran cuando se le añade biodiésel y/o aceite ligero.
- Los componentes más livianos son los primeros en destilar, debido a su baja temperatura de destilación. Cuanto mayor es la proporción de biodiésel en la mezcla, mayores son las temperaturas de destilación de esta, siguiendo la tendencia de la curva del biodiésel. Todas las curvas binarias y ternarias tienen un punto final de ebullición (FBP) entre 280 y 290 °C.
- Las propiedades como la densidad y la viscosidad aumentan cuando se agrega biodiésel y aceite ligero para todas las mezclas. Los valores de densidad para las mezclas binarias oscilan entre 822 y 835 kg/m<sup>3</sup>, siendo la mezcla con mayor valor de densidad la D80A20. Los valores de densidad de las mezclas ternarias están entre 830 y 848 kg/m<sup>3</sup>, la mezcla ternaria con mayor valor de densidad es la D60B20A20. En cuanto a la viscosidad, los valores de viscosidad cinemática para las mezclas binarias se encuentran entre 1.42 y 1.66 mm<sup>2</sup>/s y entre 1.55 y 2.15 mm<sup>2</sup>/s para las mezclas ternarias.

- La mezcla de los combustibles biodiésel y aceite ligero en algunos casos ocasiona una disminución en el valor del Índice de Cetano, aunque esto sucede sólo para las mezclas de 5 % de cada uno de los combustibles. La mezcla binaria D80B20 tiene el mayor IC, con una diferencia del 3.5 % aproximadamente respecto al diésel. La mezcla ternaria con mayor IC es la D60B20A20, con un valor de 40.02, valor mayor al diésel de referencia en un 3.6 %.
- La adición de biodiésel a las mezclas binarias y ternarias provoca una pequeña disminución del poder calorífico por debajo del diésel de referencia, esto como consecuencia del bajo poder calorífico del biodiésel. El poder calorífico de todas las mezclas se encuentra entre los valores de 44 y 45.5 MJ/kg.

### 5.1.2 EMISIONES CONTAMINANTES DE LAS MEZCLAS

- El CO emitido por el diésel puro es mayor en comparación a todas las mezclas binarias y ternarias con biodiésel y aceite ligero. En las mezclas binarias a medida que se aumenta el porcentaje de biodiésel las emisiones de CO disminuyen, en cuanto al aceite ligero a medida que aumenta su porcentaje aumenta la cantidad de CO, sin embargo los valores de monóxido de carbono en mezcla con aceite ligero están por debajo del diésel puro.
- En las mezclas ternarias el aceite ligero tuvo un mayor efecto en la emisión de CO, aunque al adicionar a la mezcla biodiésel, éste por su contenido de oxígeno disminuye el porcentaje de CO, el aceite ligero impacta aumentando la cantidad de monóxido, no obstante ninguna mezcla binaria ni ternaria emite lo mismo o más que el diésel puro.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> de las mezclas binarias y ternarias con biodiésel son más bajas en comparación al combustible diésel puro. Las mezclas binarias con 5 y 10 % de aceite ligero muestran un valor mayor con respecto al diésel en un 15 % y 1.4 %, respectivamente, siendo así la mezcla D95A5 la que mayor CO<sub>2</sub>

emite. Las emisiones de dióxido de carbono en las mezclas ternarias se ven afectadas al aumentar el porcentaje de biodiésel, mientras que al aumentar la cantidad de aceite ligero las emisiones no varían considerablemente.

- Todas las mezclas binarias y ternarias estudiadas en esta investigación mostraron que sus emisiones de HC son menores en comparación con el combustible diésel puro. En las mezclas ternarias adicionar aceite ligero y biodiésel tienen el mismo impacto, sin una variación significativa de HC entre una y otra mezcla.
- Las emisiones de  $\text{NO}_x$  para las mezclas binarias con biodiésel son mayores que las del diésel debido a su contenido de oxígeno. Las mezclas con aceite ligero presentan una disminución a medida que aumenta su participación, siendo la mezcla binaria D80B20 la que presenta menor emisión de  $\text{NO}_x$ , con una disminución respecto al diésel puro de 3 %.
- La concentración de  $\text{NO}_x$  para las mezclas ternarias disminuye con el contenido de aceite ligero, a medida que se aumenta su porcentaje. Se obtuvo la menor cantidad de óxidos de nitrógeno para la mezcla D80B10A10, con una disminución del 10.4 % en relación a la concentración del diésel de referencia, con una emisión de 576 ppm.
- El material particulado para todas las mezclas evaluadas en este estudio están por encima del diésel de referencia. A medida que el porcentaje de biodiésel aumenta tanto en las mezclas binarias como en las mezclas ternarias, las emisiones PM aumentaron. Siendo las mezclas con mayor material particulado emitido las mezclas con mayores concentración de biodiésel, que para este estudio fue de un máximo del 20 %.
- En las mezclas ternarias a medida que se aumentó el contenido de biodiésel a la mezcla, las emisiones de  $\text{NO}_x$  disminuyeron mientras las emisiones de PM aumentaron, como lo menciona la literatura.

Se necesitan más estudios con el fin de dar una justificación más minuciosa a los

comportamientos arrojados en las emisiones contaminantes para las mezclas, los cuales se dejarán como sugerencia en los trabajos a futuros, con el objeto de tener una investigación más robusta donde intervengan todos los parámetros, desde los mecanismos cinéticos de la reacciones hasta como influyen las propiedades macroscópicas y el tipo de motor donde se realice la experimentación.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Caracterizar químicamente cada uno de los combustibles para conocer su composición específica, así mismo medir las propiedades de viscosidad y tensión superficial experimentalmente, con el fin de tener valores más reales y hacer un análisis más completo de cada uno de los combustibles.
- Modelar cada una de las reacciones químicas y los mecanismos cinéticos de las mezclas en un software, bajo condiciones de operación experimentales, lo anterior con el objetivo de robustecer y hacer una justificación más amplia de los resultados encontrados en el presente trabajo.
- Estudiar el efecto de las propiedades macroscópicas del chorro de las mezclas binarias y ternarias propuestas de diésel-biodiésel-aceite ligero en el proceso de mezcla en un motor de encendido por compresión.
- Realizar un estudio del impacto de la utilización de las mezclas definidas en este trabajo, con respeto al rendimiento del motor, esto a través de la medición del consumo específico de combustible y de la misma manera de la potencia de motor, no solo a 1000 rpm, sino también a diferentes regímenes de velocidad.
- Por último, realizar un estudio similar midiendo emisiones contaminantes en la misma instalación experimental, cambiando el punto de medición, donde intervengan los sistemas de postratamiento con los que cuenta la intalación y hacer una comparación de los mismos.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] M. Suresh, C.P. Jawahar, and Arun Richard. A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92:38 – 49, 2018.
- [2] Syed Hasnain Shah. Sustainable biodiesel production. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2019.
- [3] Ejaz M. Shahid and Younis Jamal. A review of biodiesel as vehicular fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9):2484 – 2494, 2008.
- [4] Avinash Kumar Agarwal. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3):233 – 271, 2007.
- [5] S.T. Kumaravel, A. Murugesan, and A. Kumaravel. Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60:1678 – 1685, 2016.
- [6] Idoia Hita, Miriam Arabiourrutia, Martin Olazar, Javier Bilbao, José María Arandes, and Pedro Castaño. Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:745 – 759, 2016.
- [7] N. Antoniou and A. Zabaniotou. Features of an efficient and environmentally

- attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:539 – 558, 2013.
- [8] Raveendran Sindhu, Parameswaran Binod, Ashok Pandey, Snehalata Ankaram, Yumin Duan, and Mukesh Kumar Awasthi. Chapter 5 - biofuel production from biomass: Toward sustainable development. In Sunil Kumar, Rakesh Kumar, and Ashok Pandey, editors, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, pages 79 – 92. Elsevier, 2019.
- [9] Gerhard Knothe, Jürgen Krahl, and Jon Van Gerpen. *The biodiesel handbook*. Elsevier, 2015.
- [10] Ayhan Demirbas. Production of biodiesel fuels from linseed oil using methanol and ethanol in non-catalytic scf conditions. *Biomass and Bioenergy*, 33(1):113 – 118, 2009.
- [11] Gerhard Knothe and Luis F. Razon. Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58:36 – 59, 2017.
- [12] Geetesh Goga, Bhupendra Singh Chauhan, Sunil Kumar Mahla, Haeng Muk Cho, Amit Dhir, and Hee Chang Lim. Properties and characteristics of various materials used as biofuels: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(14, Part 2):28438 – 28445, 2018. International Conference on Composite Materials: Manufacturing, Experimental Techniques, Modeling and Simulation, March 1-3, 2018.
- [13] Deepak Agarwal, Shailendra Sinha, and Avinash Kumar Agarwal. Experimental investigation of control of nox emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine. *Renewable Energy*, 31(14):2356 – 2369, 2006.
- [14] CR Engler, LA Johnson, WA Lepori, and CM Yarbrough. Effects of processing and chemical characteristics of plant oils on performance of an indirect-injection diesel engine. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 60(8):1592–1596, 1983.

- 
- [15] EF Fort, PN Blumberg, HE Staph, and J Jo Staudt. Evaluation of cottonseed oils as diesel fuel. Technical report, SAE Technical Paper, 1982.
- [16] NJ Barsic, AL Humke, et al. Vegetable oils: diesel fuel supplements? *Automotive Engineering*, 89(4):37–41, 1981.
- [17] J Fuls. *Sunflower Option to a Diesel Fuel Substitute*. Department of Agriculture, 1983.
- [18] Bala Kiran, Ritunesh Kumar, and Devendra Deshmukh. Perspectives of microalgal biofuels as a renewable source of energy. *Energy Conversion and Management*, 88:1228 – 1244, 2014.
- [19] Juan Daniel Martínez, Neus Puy, Ramón Murillo, Tomás García, María Victoria Navarro, and Ana Maria Mastral. Waste tyre pyrolysis – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:179 – 213, 2013.
- [20] Wan Nor Roslam Wan Isahak, Mohamed W.M. Hisham, Mohd Ambar Yarmo, and Taufiq yap Yun Hin. A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8):5910 – 5923, 2012.
- [21] Su Shiung Lam, Rock Keey Liew, Ahmad Jusoh, Cheng Tung Chong, Farid Nasir Ani, and Howard A. Chase. Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:741 – 753, 2016.
- [22] Orhan Arpa, Recep Yumrutaş, and Zeki Argunhan. Experimental investigation of the effects of diesel-like fuel obtained from waste lubrication oil on engine performance and exhaust emission. *Fuel Processing Technology*, 91(10):1241 – 1249, 2010.
- [23] R. Maceiras, V. Alfonsín, and F.J. Morales. Recycling of waste engine oil for diesel production. *Waste Management*, 60:351 – 356, 2017. Special Thematic Issue: Urban Mining and Circular Economy.

- [24] M. Mofijur, M.G. Rasul, J. Hyde, A.K. Azad, R. Mamat, and M.M.K. Bhuiya. Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:265 – 278, 2016.
- [25] I.M. Atadashi, M.K. Aroua, and A. Abdul Aziz. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):1999 – 2008, 2010.
- [26] Ambarish Datta and Bijan Kumar Mandal. A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57:799 – 821, 2016.
- [27] R. Sakthivel, K. Ramesh, R. Purnachandran, and P. Mohamed Shameer. A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:2970 – 2992, 2018.
- [28] N. Saravanan, G. Nagarajan, and Sukumar Puhan. Experimental investigation on a di diesel engine fuelled with madhuca indica ester and diesel blend. *Biomass and Bioenergy*, 34(6):838 – 843, 2010.
- [29] S. Saravanan, R. Kaliyanasunder, B. Rajesh Kumar, and G. Lakshmi Narayana Rao. Effect of design parameters on performance and emissions of a ci engine operated with diesel-biodiesel- higher alcohol blends. *Renewable Energy*, 2019.
- [30] N.M.S. Hassan, M.G. Rasul, and C.A. Harch. Modelling and experimental investigation of engine performance and emissions fuelled with biodiesel produced from australian beauty leaf tree. *Fuel*, 150:625 – 635, 2015.
- [31] Md. Nurun Nabi, S.M. Najmul Hoque, and Md. Shamim Akhter. Karanja (pongamia pinnata) biodiesel production in bangladesh, characterization of karanja biodiesel and its effect on diesel emissions. *Fuel Processing Technology*, 90(9):1080 – 1086, 2009.

- [32] H. Raheman and A.G. Phadataré. Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel. *Biomass and Bioenergy*, 27(4):393 – 397, 2004.
- [33] Jagannath Balasaheb Hirkude and Atul S. Padalkar. Performance and emission analysis of a compression ignition: Engine operated on waste fried oil methyl esters. *Applied Energy*, 90(1):68 – 72, 2012. Energy Solutions for a Sustainable World, Special Issue of International Conference of Applied Energy, ICA2010, April 21-23, 2010, Singapore.
- [34] Qiang Fang, Junhua Fang, Jian Zhuang, and Zhen Huang. Effects of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion and emissions in premixed low temperature combustion. *Applied Thermal Engineering*, 54(2):541 – 548, 2013.
- [35] Nadir Yilmaz. Comparative analysis of biodiesel–ethanol–diesel and biodiesel–methanol–diesel blends in a diesel engine. *Energy*, 40(1):210 – 213, 2012.
- [36] Dattatray Bapu Hulwan and Satishchandra V. Joshi. Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder di diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, 88(12):5042 – 5055, 2011.
- [37] Francisco Payri González and José M<sup>a</sup> Desantes Fernández. Motores de combustión interna alternativos. *Colección Académica. Editorial UPV*, 2011.
- [38] Y.Herrerás, J.Lumbreras, J. Postigo, and E. Sánchez. *Producción de biodiésel - Aplicaciones a países en desarrollo*. 2007.
- [39] By Tim Johnson. Diesel engine emissions and their control. *Platinum Metals Review*, 52(1):23–37, 2008.
- [40] JO Keller and I Hongo. Pulse combustion: The mechanisms of nox production. *Combustion and Flame*, 80(3-4):219–237, 1990.

- [41] Richard Opat, Youngchul Ra, Roger Krieger, Rolf D Reitz, David E Foster, Russell P Durrett, Robert M Siewert, et al. Investigation of mixing and temperature effects on hc/co emissions for highly dilute low temperature combustion in a light duty diesel engine. Technical report, SAE Technical Paper, 2007.
- [42] Donald H Stedman. Automobile carbon monoxide emission. *Environmental Science & Technology*, 23(2):147–149, 1989.
- [43] Erik Velasco and Matthias Roth. Cities as net sources of co2: Review of atmospheric co2 exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass*, 4(9):1238–1259, 2010.
- [44] R Prasad and Venkateswara R Bella. A review on diesel soot emission, its effect and control. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 5(2):69–86, 2011.
- [45] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D1298-99 Standard test method for density, relative density (specific gravity), or api gravity of petroleum and liquid petroleum products by the hydrometer method. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [46] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D86-04 Standard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [47] Young S. Ernest B. et al. *Distillation principles and processes*. Macmillan, 1922.
- [48] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D240 Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [49] Juan Carlos Solís Ulloa. Diseño y construcción de un reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles: biodiésel y bioetanol como caso de estudio. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2017.

- [50] K.S. Pedersen, A. Fredenslund, P. Thomassen, and GPC. *Properties of Oils and Natural Gases*. Contributions in petroleum geology and engineering. Gulf Publishing Company, Book Division, 1989.
- [51] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D4737-96a Standard test method for calculated cetane index by four variable equation. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [52] Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends. *Fuel*, 87(10):2069 – 2075, 2008.
- [53] Mingzhang Pan, Rong Huang, Jinyang Liao, Chaojie Jia, Xiaorong Zhou, Haozhong Huang, and Xiaodong Huang. Experimental study of the spray, combustion, and emission performance of a diesel engine with high n-pentanol blending ratios. *Energy Conversion and Management*, 194:1 – 10, 2019.
- [54] M.A. Asokan, S. Senthur Prabu, Pushpa Kiran Kumar Bade, Venkata Mukesh Nekkanti, and Sri Sai Gopal Gutta. Performance, combustion and emission characteristics of juliflora biodiesel fuelled di diesel engine. *Energy*, 173:883 – 892, 2019.
- [55] K.A. Abed, M.S. Gad, A.K. El Morsi, M.M. Sayed, and S. Abu Elyazeed. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2):183 – 188, 2019.
- [56] Mehmet Reşit Seraç, Selman Aydın, Adem Yılmaz, and Seyfi Şevik. Evaluation of comparative combustion, performance, and emission of soybean-based alternative biodiesel fuel blends in a ci engine. *Renewable Energy*, 2019.
- [57] Selman Aydın and Cenk Sayın. Impact of thermal barrier coating application on the combustion, performance and emissions of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel–diesel blends. *Fuel*, 136:334 – 340, 2014.
- [58] D. Littera, A. Cozzolini, M. Besch, D. Carder, and M. Gautam. Effect of

---

turbulence intensity on pm emission of heavy duty diesel trucks - wind tunnel studies. *Atmospheric Environment*, 162:31 – 44, 2017.

DATOS DESTILACIONES ASTM  
D86-04 COMBUSTIBLES

---

Tabla 1: Datos destilación D100

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.12	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	125.5	125.92
<b>5</b>	154	154.45
<b>10</b>	161	161.45
<b>15</b>	167	167.46
<b>20</b>	171.5	171.97
<b>25</b>	176.5	176.97
<b>30</b>	180	180.47
<b>35</b>	186	186.48
<b>40</b>	191	191.49
<b>45</b>	197	197.49
<b>50</b>	202.5	203.00
<b>55</b>	209	209.51
<b>60</b>	215	215.51
<b>65</b>	220.5	221.02
<b>70</b>	229.5	230.03
<b>75</b>	237	237.54
<b>80</b>	246	246.55
<b>85</b>	255.5	256.06
<b>90</b>	266	266.57
<b>95</b>	282	282.59
<b>FBP</b>	287	287.59
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97.5	97.59
<b>% Vol. Residuo</b>	1.275	1.275
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.225	1.132

Tabla 2: Datos destilación B100

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica [kPa]</b>	100.33	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	79	79.31
<b>5</b>	264	264.47
<b>10</b>	269.5	269.97
<b>15</b>	274.5	274.98
<b>20</b>	274	274.48
<b>25</b>	275.5	275.98
<b>30</b>	276	276.48
<b>35</b>	278	278.48
<b>40</b>	278.5	278.98
<b>45</b>	278.5	278.98
<b>50</b>	278.5	278.98
<b>55</b>	279	279.48
<b>60</b>	279	279.48
<b>65</b>	279.5	279.98
<b>70</b>	280	280.48
<b>75</b>	281.5	281.98
<b>80</b>	283	283.48
<b>85</b>	283.5	283.99
<b>90</b>	2765	276.98
<b>95</b>	245	245.45
<b>FBP</b>	245.5	245.95
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.05	96.16
<b>% Vol. Residuo</b>	2.425	2.425
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.525	1.414

Tabla 3: Datos de destilación D95B5

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	100.15	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	127	127.414
<b>5</b>	152.5	152.95
<b>10</b>	159.5	159.95
<b>15</b>	165	165.45
<b>20</b>	169	169.46
<b>25</b>	175	175.46
<b>30</b>	179.5	179.97
<b>35</b>	184.5	184.97
<b>40</b>	189.5	189.98
<b>45</b>	196.5	196.98
<b>50</b>	202.5	202.99
<b>55</b>	208.5	208.99
<b>60</b>	215.5	216.00
<b>65</b>	223	223.51
<b>70</b>	231	231.52
<b>75</b>	239	239.52
<b>80</b>	248.5	249.045
<b>85</b>	258	258.55
<b>90</b>	268	268.56
<b>95</b>	279	279.57
<b>FBP</b>	282.5	283.075
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97.75	97.775
<b>% Vol. Residuo</b>	1.55	1.55
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.7	0.675

Tabla 4: Datos de destilación D90B10

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	100.67	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	122	122.22
<b>5</b>	154	154.24
<b>10</b>	160.5	160.74
<b>15</b>	168	168.25
<b>20</b>	173	173.25
<b>25</b>	179.5	179.76
<b>30</b>	186	186.26
<b>35</b>	192.5	192.76
<b>40</b>	199	199.27
<b>45</b>	207.5	207.77
<b>50</b>	212.5	212.77
<b>55</b>	219	219.28
<b>60</b>	227.5	227.78
<b>65</b>	235.5	235.79
<b>70</b>	244	244.29
<b>75</b>	252.5	252.80
<b>80</b>	259.5	259.80
<b>85</b>	268.5	268.80
<b>90</b>	275.5	275.81
<b>95</b>	284.5	284.81
<b>FBP</b>	289	289.31
<b>% Vol. Total recuperado</b>	98	98.014
<b>% Vol. Residuo</b>	1.3	1.3
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.7	0.685

Tabla 5: Datos de destilación D80B20

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	100.39	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	127	127.33
<b>5</b>	150.5	150.85
<b>10</b>	160	160.35
<b>15</b>	167.5	167.86
<b>20</b>	174.5	174.87
<b>25</b>	180.5	180.87
<b>30</b>	189	189.38
<b>35</b>	197.5	197.88
<b>40</b>	206	206.39
<b>45</b>	214	214.40
<b>50</b>	220.5	220.90
<b>55</b>	229.5	229.91
<b>60</b>	238.5	238.92
<b>65</b>	247.5	247.93
<b>70</b>	255	255.43
<b>75</b>	263.5	263.94
<b>80</b>	268.5	268.94
<b>85</b>	274.5	274.95
<b>90</b>	278.5	278.95
<b>95</b>	287	287.46
<b>FBP</b>	290	290.96
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.75	96.783
<b>% Vol. Residuo</b>	2.425	2.425
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.852	0.792

Tabla 6: Datos de destilación D95A5

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.08	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	130	130.07
<b>5</b>	149	149.08
<b>10</b>	159	159.08
<b>15</b>	165	165.08
<b>20</b>	169	169.08
<b>25</b>	174	174.08
<b>30</b>	181	181.08
<b>35</b>	187.5	187.59
<b>40</b>	193.5	193.59
<b>45</b>	198	198.09
<b>50</b>	207.5	207.59
<b>55</b>	215.5	215.59
<b>60</b>	221	221.09
<b>65</b>	228	228.09
<b>70</b>	235	235.10
<b>75</b>	243	243.10
<b>80</b>	252	252.10
<b>85</b>	261	261.10
<b>90</b>	273	273.10
<b>95</b>	285.5	285.61
<b>FBP</b>	285.5	285.61
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97	97.012
<b>% Vol. Residuo</b>	2	2
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1	0.978

Tabla 7: Datos de destilación D90A10

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.32	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	125	124.99
<b>5</b>	149	148.99
<b>10</b>	160	159.99
<b>15</b>	167	166.99
<b>20</b>	172	171.99
<b>25</b>	180	179.99
<b>30</b>	187	186.99
<b>35</b>	195	194.99
<b>40</b>	200	199.99
<b>45</b>	209	208.99
<b>50</b>	216	215.99
<b>55</b>	220	219.99
<b>60</b>	229	228.99
<b>65</b>	238	237.99
<b>70</b>	245	244.99
<b>75</b>	253	252.99
<b>80</b>	261	260.99
<b>85</b>	271	270.99
<b>90</b>	280	279.99
<b>95</b>	288.5	288.49
<b>FBP</b>	289	288.99
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96	95.995
<b>% Vol. Residuo</b>	1.9	1.9
<b>% Vol. Pérdidas</b>	2.1	2.104

Tabla 8: Datos de destilación D80A20

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.32	101.3
<b>% Vol. Recuperado</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	137.5	137.49
<b>5</b>	150	149.99
<b>10</b>	160.5	160.49
<b>15</b>	169	168.99
<b>20</b>	177.5	177.49
<b>25</b>	185	184.99
<b>30</b>	191	190.99
<b>35</b>	200	199.99
<b>40</b>	208	207.99
<b>45</b>	218.5	218.49
<b>50</b>	224.5	224.49
<b>55</b>	230	229.99
<b>60</b>	238	237.99
<b>65</b>	247	246.99
<b>70</b>	254	253.99
<b>75</b>	260	259.99
<b>80</b>	269.5	269.49
<b>85</b>	277	276.99
<b>90</b>	281.5	281.49
<b>95</b>	282.5	282.49
<b>FBP</b>	290	289.99
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97	96.998
<b>% Vol. Residuo</b>	2	2
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1	1.001

Tabla 9: Datos de destilación D90B5A5

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	100.97	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	141	141.12
<b>5</b>	151	151.13
<b>10</b>	160	160.13
<b>15</b>	168	168.13
<b>20</b>	175	175.13
<b>25</b>	180	180.13
<b>30</b>	187.5	187.64
<b>35</b>	194.5	194.64
<b>40</b>	201	201.14
<b>45</b>	209	209.14
<b>50</b>	216	216.15
<b>55</b>	223.5	223.65
<b>60</b>	232.5	232.65
<b>65</b>	240.5	240.65
<b>70</b>	250	250.16
<b>75</b>	258.5	258.66
<b>80</b>	265	265.16
<b>85</b>	271.5	271.66
<b>90</b>	280.5	280.66
<b>95</b>	289	289.17
<b>FBP</b>	289	289.17
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97.7	97.735
<b>% Vol. Residuo</b>	0.9	0.901
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.4	1.364

Tabla 10: Datos de destilación D85B5A10

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.41	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	138	137.96
<b>5</b>	151	150.96
<b>10</b>	158.5	158.46
<b>15</b>	166	165.96
<b>20</b>	172.5	172.46
<b>25</b>	181	180.96
<b>30</b>	189	188.95
<b>35</b>	195.5	195.45
<b>40</b>	205	204.95
<b>45</b>	211	210.95
<b>50</b>	218.5	218.45
<b>55</b>	226.5	226.45
<b>60</b>	235	234.95
<b>65</b>	243	242.95
<b>70</b>	251.5	251.45
<b>75</b>	259	258.95
<b>80</b>	266.5	266.45
<b>85</b>	273	272.95
<b>90</b>	281	280.95
<b>95</b>	289	288.94
<b>FBP</b>	289	288.94
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.7	97.473
<b>% Vol. Residuo</b>	1.95	1.95
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.55	0.577

Tabla 11: Datos de destilación D75B5A20

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.41	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	142	141.96
<b>5</b>	158	157.96
<b>10</b>	165.5	165.46
<b>15</b>	174.5	174.46
<b>20</b>	183.5	183.45
<b>25</b>	190	189.95
<b>30</b>	199	198.95
<b>35</b>	206.5	206.45
<b>40</b>	214.5	214.45
<b>45</b>	222	221.95
<b>50</b>	230.5	230.45
<b>55</b>	238.5	238.45
<b>60</b>	244.5	244.45
<b>65</b>	252	251.95
<b>70</b>	258	257.95
<b>75</b>	265	264.95
<b>80</b>	270	269.95
<b>85</b>	276.5	276.45
<b>90</b>	284	283.94
<b>95</b>	284	283.94
<b>FBP</b>	287	286.94
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97.25	97.232
<b>% Vol. Residuo</b>	1	1
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.75	1.768

Tabla 12: Datos de destilación D85B10A5

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.37	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	140	139.97
<b>5</b>	153	152.97
<b>10</b>	162	161.97
<b>15</b>	171	170.97
<b>20</b>	178	177.97
<b>25</b>	183	182.97
<b>30</b>	191	190.97
<b>35</b>	199.5	199.47
<b>40</b>	207.5	207.47
<b>45</b>	214	213.97
<b>50</b>	222.5	222.47
<b>55</b>	231	230.97
<b>60</b>	239.5	239.47
<b>65</b>	247	246.97
<b>70</b>	253	252.97
<b>75</b>	260.5	260.47
<b>80</b>	268.5	268.47
<b>85</b>	273	272.97
<b>90</b>	280	279.97
<b>95</b>	281	280.97
<b>FBP</b>	282	281.97
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.5	96.49
<b>% Vol. Residuo</b>	2.25	2.25
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.25	1.26

Tabla 13: Datos de destilación D80B10A10

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.37	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	139.5	139.47
<b>5</b>	153	152.97
<b>10</b>	162.5	162.47
<b>15</b>	171	170.97
<b>20</b>	179	178.97
<b>25</b>	185.5	185.47
<b>30</b>	194	193.97
<b>35</b>	202.5	202.47
<b>40</b>	211	210.97
<b>45</b>	218	217.97
<b>50</b>	228	224.97
<b>55</b>	233	232.97
<b>60</b>	242.5	242.47
<b>65</b>	250	249.97
<b>70</b>	257	256.97
<b>75</b>	261	260.97
<b>80</b>	269	268.97
<b>85</b>	275	274.97
<b>90</b>	280	279.97
<b>95</b>	280.5	280.47
<b>FBP</b>	281.5	281.47
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.5	96.49
<b>% Vol. Residuo</b>	2.55	2.55
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.95	0.96

Tabla 14: Datos de destilación D70B10A20

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.55	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	143	142.91
<b>5</b>	159	158.90
<b>10</b>	168	167.90
<b>15</b>	177	176.90
<b>20</b>	186	185.90
<b>25</b>	196	195.89
<b>30</b>	204	203.89
<b>35</b>	212	211.89
<b>40</b>	220	219.89
<b>45</b>	228	227.89
<b>50</b>	237	236.89
<b>55</b>	243.5	243.38
<b>60</b>	250.5	250.38
<b>65</b>	259	258.88
<b>70</b>	263	262.88
<b>75</b>	269.5	269.38
<b>80</b>	273	272.88
<b>85</b>	278.5	278.38
<b>90</b>	282.5	282.38
<b>95</b>	281.5	281.38
<b>FBP</b>	283	282.87
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96.5	96.46
<b>% Vol. Residuo</b>	1.75	1.75
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1.75	1.79

Tabla 15: Datos de destilación D75B20A5

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.55	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	140	139.91
<b>5</b>	155	154.90
<b>10</b>	166.5	166.40
<b>15</b>	174.5	174.40
<b>20</b>	181	180.90
<b>25</b>	190.5	190.40
<b>30</b>	199	198.90
<b>35</b>	207.5	207.40
<b>40</b>	217	216.89
<b>45</b>	226	225.89
<b>50</b>	234.5	234.39
<b>55</b>	242.5	242.38
<b>60</b>	250.5	250.38
<b>65</b>	257.5	257.385
<b>70</b>	264	263.88
<b>75</b>	269.5	269.38
<b>80</b>	274.5	274.38
<b>85</b>	279.5	279.38
<b>90</b>	283	282.8749
<b>95</b>	283	282.8749
<b>FBP</b>	284	283.874675
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97	97.008
<b>% Vol. Residuo</b>	2.75	2.75
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.25	0.242

Tabla 16: Datos de destilación D70B20A10

	<b>Observado</b>	<b>Corregido</b>
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.55	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>IBP</b>	143	142.90
<b>5</b>	156	155.90
<b>10</b>	166	165.90
<b>15</b>	175.5	175.40
<b>20</b>	183.5	183.340
<b>25</b>	195.5	195.40
<b>30</b>	203.5	203.40
<b>35</b>	212.5	212.40
<b>40</b>	221.5	221.39
<b>45</b>	230	229.89
<b>50</b>	239.5	239.38
<b>55</b>	247.5	247.38
<b>60</b>	255	254.88
<b>65</b>	260.5	260.38
<b>70</b>	266.5	266.38
<b>75</b>	270.5	270.38
<b>80</b>	275.5	275.38
<b>85</b>	279.5	279.37
<b>90</b>	283.5	283.37
<b>95</b>	280	279.87
<b>FBP</b>	285	284.87
<b>% Vol. Total recuperado</b>	96	95.987
<b>% Vol. Residuo</b>	3.1	3.1
<b>% Vol. Pérdidas</b>	0.9	0.913

Tabla 17: Datos de destilación D60B20A20

	Observado	Corregido
<b>Presión barométrica (kPa)</b>	101.55	101.3
<b>% Vol. Destilado</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Temperatura</b>
<b>IBP</b>	147	146.91
<b>5</b>	160	159.90
<b>10</b>	172.5	172.40
<b>15</b>	182.5	182.40
<b>20</b>	193.5	193.40
<b>25</b>	204.5	204.39
<b>30</b>	213.5	213.39
<b>35</b>	223.5	223.39
<b>40</b>	233	232.89
<b>45</b>	241	240.88
<b>50</b>	249	248.88
<b>55</b>	255.5	255.38
<b>60</b>	260.5	260.38
<b>65</b>	266	265.88
<b>70</b>	270	269.88
<b>75</b>	274.5	274.38
<b>80</b>	278.5	278.38
<b>85</b>	282.5	282.38
<b>90</b>	287.5	287.37
<b>95</b>	286	285.87
<b>FBP</b>	290	289.87
<b>% Vol. Total recuperado</b>	97.5	97.963
<b>% Vol. Residuo</b>	1.5	1.5
<b>% Vol. Pérdidas</b>	1	0.537

# PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS MEZCLAS

---

Tabla 18: Propiedades fisicoquímicas de las mezclas binarias.

Mezclas	Densidad @ 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de cetano	Viscosidad @ 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Poder Calorífico (kJ/kg)
D95B5	825.92	38.184	1.438	45100.9
D90B10	829.399	39.483	1.547	44820.09
D80B20	832.397	40.203	1.631	44258.45
D95A5	828.401	38.564	1.476	45382.98
D90A10	831.36	39.662	1.557	45384
D80A20	835.376	39.986	1.661	45386.74

Tabla 19: Propiedades fisicoquímicas de las mezclas ternarias.

Mezclas	Densidad @ 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de cetano	Viscosidad @ 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Poder Calorífico (kJ/kg)
D90B5A5	829.561	39.076	1.5875	45340.2
D85B5A10	833.377	39.290	1.638	45379.77
D75B5A20	840.372	39.617	1.773	45355.71
D85B10A5	836.318	39.271	1.659	45227.37
D80B10A10	838.336	39.543	1.702	45272.72
D70B10A20	843.39	39.886	1.848	45212.245
D75B20A5	841.333	39.679	1.817	44454.15
D70B20A10	843.169	39.866	1.869	44527.18
D60B20A20	848.328	40.179	2.0401	44396.79