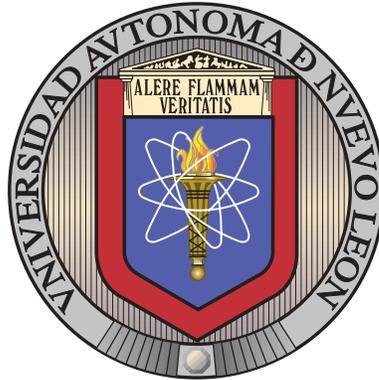


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE  
UN MOTOR DIESEL EN UN CIRCUITO URBANO  
UTILIZANDO UN COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

POR

BRANDON REYES RAMÍREZ

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

DICIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE  
UN MOTOR DIESEL EN UN CIRCUITO URBANO  
UTILIZANDO UN COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

POR

BRANDON REYES RAMÍREZ

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

DICIEMBRE 2023

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Análisis de las emisiones contaminantes de un motor Diesel en un circuito urbano utilizando un combustible alternativo”, realizada por la estudiante Brandon Reyes Ramírez, con número de matrícula 2130448, 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 Evaluación de Tesis**

Dr. Simón Martínez Martínez  
Director

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo  
Co-Director

Dr. Héctor Daniel García Lara  
Revisor

M.C. Fernando Ibarra Hernández  
Revisor

M.C. René Pérez Pérez  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4320

Ciudad Universitaria, a 27 de febrero de 2024.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>x</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introduccion</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	5
1.2.1. Motores de combustión interna . . . . .	5
1.2.2. Biocombustibles . . . . .	7
1.2.3. Mezclas Diesel-Aceite residual de plásticos . . . . .	8
1.2.4. Mezclas diésel-biodiésel . . . . .	10
1.2.5. Mezclas biodiésel-aceite de residuos plásticos . . . . .	11
1.2.6. Mezclas ternarias diésel-aceite de residuos plásticos y aditivos	12
1.3. Hipótesis . . . . .	14
1.4. Objetivos . . . . .	15
1.4.1. Objetivo general . . . . .	15

---

1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	15
1.5. Justificación . . . . .	16
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Motores de encendido provocado . . . . .	17
2.1.1. Ciclo de operación del motor. . . . .	19
2.1.2. Componentes del motor . . . . .	20
2.1.3. Operación de un motor de encendido por compresión . . . . .	21
2.2. Combustibles Alternativos . . . . .	23
2.2.1. Biocombustibles introducción . . . . .	23
2.2.2. Biodiésel . . . . .	24
2.2.3. Aceite residual de plástico . . . . .	25
2.3. Estándares para la regulación de emisiones . . . . .	28
2.3.1. Estados Unidos de América . . . . .	29
2.3.2. Unión Europea . . . . .	30
2.3.3. México . . . . .	31
<b>3. Metodología</b>	<b>33</b>
3.1. Aceite de residuos plásticos (WPO) . . . . .	34
3.2. Aceite de residuos de cocina (WCO) . . . . .	36
3.3. Herramientas experimentales . . . . .	37
3.3.1. Sistema analizador de gases (MAHA MET 6.3) . . . . .	38

---

3.3.2. Sistema de suministro de combustible . . . . .	42
3.3.3. Sistema de alimentación . . . . .	43
3.3.4. Protocolo de ensayos experimentales . . . . .	44
3.3.5. Sistema de posicionamiento global . . . . .	45
3.3.6. Matriz experimental . . . . .	46
3.4. Herramientas estadísticas . . . . .	47
3.4.1. Factor de emisión: . . . . .	47
3.4.2. Potencia específica del vehículo: . . . . .	48
3.4.3. Tasas de emisión . . . . .	49
3.4.4. Discretización de datos . . . . .	50
<b>4. Resultados experimentales</b>	<b>55</b>
4.1. Factor de emisión y tasa de emisión a bajas velocidades . . . . .	55
4.2. Factor de emisión y tasa de emisión en distintas condiciones de ace- leración . . . . .	60
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>69</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	69
5.2. Trabajos futuros . . . . .	71
<b>A. PROCESADO DE DATOS</b>	<b>72</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Componentes principales de un motor Diesel. . . . .	20
2.2. Conjunto de cigüeñal con transmisión por engranajes. . . . .	20
2.3. Proporción de las emisiones de GEI del sector del transporte de EUA (U.S. EPA 2021a) . . . . .	24
3.1. Diagrama metodología . . . . .	33
3.2. Proceso pirolítico . . . . .	35
3.3. Esquema de la instalación experimental . . . . .	38
3.4. Analizador de gases combinado MAHA MET 6.3 . . . . .	39
3.5. Componentes que conforman el sistema completo del analizador MAHA MET 6.3 . . . . .	40
3.6. Sistema de suministro de combustible . . . . .	43
3.7. Sistema de suministro de energía eléctrica . . . . .	43
3.8. Logotipo de la aplicación Geo tracker . . . . .	45
3.9. Circuito urbano para pruebas experimentales. . . . .	47

---

4.1. Factor de emisión para D100, WPO100 y WPO100B20, a bajas velocidades . . . . .	56
4.2. Tasas de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, a bajas velocidades . . . . .	61
4.3. Factor de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, en diferentes condiciones de aceleración. . . . .	63
4.4. Tasas de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, en diferentes condiciones de aceleración . . . . .	66
A.1. Diagrama de flujo "Discretización de datos"(parte 1). . . . .	73
A.2. Diagrama de flujo "Discretización de datos"(parte 2). . . . .	74
A.3. Diagrama de flujo "Discretización de datos"(parte 3). . . . .	75

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Estándar de emisión para un vehículo de carga ligero: Tier 2 (EUA) . . . . .	29
2.2. Estándar de emisión para vehículos ligeros: Euro (EU) . . . . .	31
2.3. Límites máximos para vehículos nuevos: Métodos CT y SCE . . . . .	32
2.4. Límites máximos para vehículos nuevos: Métodos CEEC y CET . . . . .	32
3.1. Propiedades fisicoquímicas del diésel y WPO . . . . .	36
3.2. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel y diésel . . . . .	37
3.3. Principales características del vehículo de prueba . . . . .	39
3.4. Datos técnicos y de medición MAHA MET 6.3 . . . . .	41
3.5. Matriz experimental . . . . .	46

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco al CONAHCYT por la beca otorgada número 1176162 para que pudiera realizar mis estudios de maestría.

Agradezco por el apoyo del Laboratorio Nacional para el Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de los Biocombustibles (LaNDACBio) a través del proyecto CONHACYT - 315787. Además, esta investigación también fue financiada por el proyecto UANL - ProACTI 160 - IDT - 2023, y también por la Secretaría de Educación Pública con la subvención 511/2023 - 2696 - 31.

Este proyecto fue realizado en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energía Térmica y Renovable (GETR) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Agradezco a mi madre Virginia Ramírez Cuachayo, a mi padre Jose Manuel Reyes Ramos, así como a mis hermanos Jayro Emmanuel Reyes Ramírez y Dennis Guadalupe Reyes Ramírez, a mi abuela Margarita Ramos Lopez por el apoyo incondicional que me demuestran día a día. De igual forma agradezco a mi director de tesis el Doctor Simón Martínez Martínez, y a mi codirector el Doctor Daniel de la Rosa Urbalejo.

Agradezco también a mis compañeros de maestría el Ingeniero Omar Salomón Barbosa, Erick Valentin Maqueda Aguilar y Angel Leonides Rodriguez Ramos por todo el apoyo brindado a mi persona.

# RESUMEN

---

BRANDON REYES RAMÍREZ.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmicas y Renovables.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: ANÁLISIS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DIESEL EN UN CIRCUITO URBANO UTILIZANDO UN COMBUSTIBLE ALTERNATIVO.

Número de páginas: 80.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Obtener un análisis de los resultados experimentales de las emisiones generadas en un proceso de combustión en un motor diésel para una mezcla de residuos plásticos-biodiésel en un circuito urbano, para comparar su comportamiento con distintos porcentajes de mezcla. Mediante herramientas estadísticas (ecuación de factor de emisión) y herramientas experimentales (Mercedes Van Spinter 415 CDI y analizador de gases MAHA MET 6.3).

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Se contribuyo en el desarrollo de una metodología para el conocimiento de las emisiones generadas por un vehículo en circunstancias de tránsito, así mismo la aportación de los datos en términos de factor de emisión de los combustibles utilizados en la presente investigación demostrando que su uso puede ser una opción para la reducción de emisiones.

En cuanto a las emisiones se cree que debido a que el WPO100 exhibió mayor índice de cetano, HHV y tensión superficial, se obtuvieron algunos beneficios, por ejemplo, una disminución en la generación de PM y  $NO_x$ . Sin embargo, el principal

inconveniente de emplear WPO-DL fue el aumento de la producción de CO y HC.

En el consumo de combustible se pudo notar una pequeña reducción cuando se utilizaron WPO100 y WPO80WCO20 en lugar de D100.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCION

---

## 1.1 MOTIVACIÓN

A lo largo de la historia del ser humano se puede notar su particular interés en satisfacer sus necesidades, siendo el sistema energético una de las principales. El propósito del sistema energético global es brindar un servicio a la población que incrementa año con año de manera exponencial, por tal motivo los desafíos de mitigar el cambio climático a través del uso de combustibles alternativos (CA) toma cada vez mayor relevancia dentro de los intereses sociales. Los aumentos en la demanda de energía crean una carga cada vez mayor para la reducción de emisiones en la descarbonización del lado de los encargados de suministrar el servicio energético a los usuarios finales [1]. Las urbes en México enfrentan graves inconvenientes relacionados con la contaminación del medio ambiente, y el ámbito del transporte se destaca como una de las principales fuentes, contribuyendo con un 24.4% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De este porcentaje, el 16.2% se origina específicamente en el sector automotriz, mayormente atribuido a desplazamientos en vehículos individuales según un informe [2].

El estado de Nuevo León con una extensión territorial en su área metropolitana de 6974 km<sup>2</sup> dividido en 13 municipios, es la tercer área urbana más poblada del

país con más de 4,653,458 habitantes y es la segunda región industrial más grande responsable del 9% del producto interno bruto (PIB). Hay 2.2 millones de vehículos matriculados en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), siendo la ciudad con mayor índice de motorización vehicular en México (0.5 vehículos por habitante) [3].

Los combustibles alternativos han ganado relevancia en los últimos años, con el objetivo de descarbonizar el sector del transporte en circuitos urbanos, abordando principalmente cuestiones de la calidad del aire, se han explorado combustibles alternativos con diferentes materias primas para su fabricación, demostrando la viabilidad de su uso en circuitos urbanos [4].

La mayoría de los países a nivel global están presenciando un rápido fenómeno de urbanización. El transporte se considera un factor importante en el rápido desarrollo de las personas y la economía, porque la condición económica de cualquier país depende de la movilidad, la facilidad de movimiento de personas, bienes y servicios a través del sistema. En términos de opciones de transporte, el transporte en circuitos urbanos es la forma de transporte más común debido a su flexibilidad. El transporte en circuitos urbanos incluye una amplia gama de vehículos, desde vehículos ligeros hasta vehículos pesados [5].

El empleo excesivo de vehículos ocasiona un aumento en las emisiones derivadas de los procesos de combustión, dando lugar a la contaminación atmosférica. Este tipo de contaminante representa uno de los principales riesgos para la salud, contribuyendo a la morbilidad asociada con accidentes cerebrovasculares, enfermedades cardiovasculares, carcinomas pulmonares y trastornos respiratorios crónicos y agudos, incluyendo el asma. La reducción de los niveles de contaminación atmosférica se traduciría en una mejora significativa de la salud poblacional, tanto en el corto como en el largo plazo. En la mayoría de los países enfrentan estos problemas medioambientales con regulaciones basadas en modelos norteamericanos como los desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y los modelos europeos Estándares de Emisiones Europeos (EURO) para reducir continuamente el

impacto negativo de los vehículos en la calidad del aire [6]. En el caso particular de México que cuenta con sus propias normativas (Normas Oficiales Mexicanas, NOM) que establecen valores normados (VN) para la concentración de emisiones, como la NOM-023-SSAI-2021, la cual establece los VN para la concentración de Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el aire siendo las fuentes móviles responsable del 43.71 %, de la misma forma la NOM-021-SSAI-2021 establece VN para la concentración de Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ) de igual manera las fuentes móviles son responsables del 63.41 %.

Adicionalmente la creciente preocupación a nivel internacional que se tiene por el deterioro de la calidad del aire siendo una causa sobresaliente el incremento poblacional que lleva como consecuencia los excesos en el uso de aceites comestibles que no son desechados de manera adecuada, el uso desmedido de medios de transporte, la sobre producción de materiales plásticos derivados del petróleo, los cuales al terminar su vida útil son desechados en su gran mayoría después del primer uso, teniendo como consecuencia la contaminación de aire, agua y suelo [7, 8].

Se tiene un amplio conocimiento acerca de las mezclas de diésel y combustibles alternativos, aceite de residuos plásticos (WPO) y Biodiésel (B) en motores de prueba tipo bancada en relación a las emisiones generadas por un proceso de combustión, sin embargo, se tiene poco conocimiento en pruebas en circuitos urbanos con este tipo de mezclas, teniendo en cuenta que el combustible que tiene como base de los desechos plásticos posee características similares al diésel, puede funcionar como un combustible alternativo, ayudando a la reducción de la contaminación por los plásticos utilizados día con día [5, 8, 9, 7].

Tradicionalmente las pruebas con dinamómetros se han utilizado para medir y monitorear las emisiones vehiculares que se han tomado como referencia para el modelado del impacto en la calidad del aire relacionada con el tráfico en circuitos urbanos. A pesar de que se intenta con pruebas de bancada reproducir las condiciones de un circuito urbano, es muy probable que no sea realmente una buena aproxima-

---

ción, por lo tanto en los últimos años se han dirigido importantes esfuerzos para medir y analizar las emisiones generadas en un circuito urbano siendo este tipo de análisis la mejor forma de estudiar el comportamiento de las emisiones. [5].

## 1.2 ANTECEDENTES

### 1.2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Los motores térmicos han desempeñado un papel fundamental en la sociedad durante más de dos siglos y medio. En los primeros 150 años, el proceso implicaba la conversión de agua en vapor, actuando como un intermediario entre los gases de combustión generados por la quema del combustible y el pistón expansor en el cilindro, encargado de realizar trabajo. No fue hasta la década de 1860 que el motor de combustión interna se materializó como una tecnología práctica. En sus primeras aplicaciones comerciales, estos motores utilizaban mezclas de aire y carbón a presión atmosférica, sin aplicar compresión previa a la combustión. Para mejorar el proceso se introdujo una válvula deslizante que controlaba la entrada, el encendido por una llama de gas y el escape. Para superar las deficiencias Otto propuso un ciclo de motor con cuatro carreras de pistón: una carrera de admisión, una carrera de ignición, una carrera de potencia o de expansión y por último una carrera de escape.

Hasta 1876, el ciclo de cuatro tiempos de Otto estuvo en vigencia. Surgieron motores de aceite con baja relación de compresión, dotados de vaporizadores de combustible externos calentados y encendido eléctrico, logrando eficiencias comparables a los motores de gas (entre un 14 y un 18 por ciento). En este contexto, el motor Hornsby-Ackroyd se destacó como el más popular en Gran Bretaña y también experimentó una producción significativa en los Estados Unidos.

En 1892, Rudolf Diesel (1858-1913), un ingeniero alemán, introdujo una nueva perspectiva para el motor de combustión interna en su patente. Su innovación de iniciar la combustión mediante la inyección de un combustible líquido en aire calentado exclusivamente por compresión permitió duplicar la eficiencia en comparación con otros motores de combustión interna. Este enfoque posibilitó relaciones de expansión mucho mayores sin problemas de detonación o impactos. Sin embargo, a pesar de los

esfuerzos de Diesel y los recursos combinados de M.A.N. en Ausburg, se necesitaron cinco años para concretar el desarrollo de un motor. En las últimas tres décadas, se han identificado factores de cambio que han adquirido importancia y que influyen significativamente en el diseño y la operación de los motores. En primer lugar, destaca la necesidad de controlar la contribución de los automóviles a la contaminación del aire en entornos urbanos. En segundo lugar, se ha reconocido la importancia de lograr mejoras sustanciales en el rendimiento del combustible de los vehículos.

El problema de la contaminación del aire causada por los automóviles se hizo evidente en la década de 1940 en la cuenca de Los Ángeles. En 1952, el Prof. A. J. Haagen-Smit demostró que el problema del humo se originaba por las reacciones entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos de hidrocarburos en presencia de la luz solar. Con el tiempo, se evidenció que los automóviles eran contribuyentes significativos a las emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, así como la principal causa de los altos niveles de monóxido de carbono en áreas urbanas. Los motores diésel, por su parte, son fuentes importantes de pequeñas partículas de hollín o humo, así como de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. En Europa, se han establecido estándares de emisión mediante la evolución de las normativas EURO, no solo para motores diésel, sino también para otras aplicaciones de motores. Estos estándares han logrado reducciones sustanciales en las emisiones de los motores diésel. Las regulaciones de control de emisiones, junto con los avances en combustibles, han generado cambios significativos en la forma en que se diseñan y operan los motores de combustión interna.

En la década de 1970, el precio del petróleo crudo aumentó rápidamente, alcanzando varias veces su costo en términos reales en 1970, lo que generó preocupaciones sobre la disponibilidad a largo plazo del petróleo. En respuesta a esto, se ha dedicado considerable esfuerzo a la investigación y desarrollo de combustibles alternativos al diésel. Entre ellos, los combustibles no derivados del petróleo, como los aceites vegetales, están recibiendo especial atención, así como los aceites provenientes de residuos de productos derivados del petróleo, como neumáticos y plásticos, entre

otros. [10]

El funcionamiento de los motores de combustión interna a lo largo de muchos años ha sido gracias a combustibles fósiles no renovables, siendo estos una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el hombre. En los últimos años el biodiésel ha ganado importancia como combustible alternativo para los motores. La producción biodiésel aumento en 105 mil millones de litros en 2010, lo que significo un 17% más que la producción del 2009. Los biocombustibles representaron el 2.7% del combustible mundial para el transporte por carretera en el mismo año, con más del 90% producido en los Estados Unidos de América y Brasil. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, los biocombustibles pueden usarse para cubrir una cuarta parte de las necesidades de combustible de transporte para el año 2050

### 1.2.2 BIOCMBUSTIBLES

Es bien sabido que los aceites vegetales y las grasas animales se investigaron como combustible diésel mucho antes de que la crisis energética de los años setenta y principios de los ochenta despertaran un renovado interés en los combustibles alternativos. Rudolf Diesel el inventor del motor que lleva su nombre, tuvo cierto interés en los combustibles de origen vegetal, sin embargo, la historia temprana de los combustibles diésel a base de aceite vegetal que menciona en su libro titulado "Die Entstehung des Dieselmotors" (la aparición del motor Diesel) en el capítulo B combustibles líquidos, Diesel aborda el uso de combustibles vegetales como combustible. En el año de 1900 los aceites vegetales se usaron con éxito en un motor Diesel durante una exposición que se llevo a cabo en París, dicho motor fue operado por la compañía Otto; el motor fue construido para un funcionamiento con combustible derivado del petróleo y se usó con aceite vegetal sin ningún cambio.

En la década de 1940, el aceite de palma fue frecuentemente contemplado como

una posible fuente de combustible diésel en los análisis históricos. Actualmente, la consideración de diversos aceites y grasas como potenciales fuentes de combustible diésel vuelve a ser un aspecto relevante. Además, la búsqueda de la independencia energética también se refleja en otras investigaciones históricas.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los aceites vegetales fueron utilizados como combustibles de emergencia y para diversos propósitos. Por ejemplo, Brasil tomó la medida de prohibir la exportación de aceite de semilla de algodón, sustituyéndolo por combustible diésel importado. En Argentina, también se registraron reducciones en las importaciones de combustible líquido, lo que llevó a la utilización comercial de aceites vegetales. Sin embargo, las urgencias de la guerra impulsaron la instalación apresurada de plantas de craqueo basadas en datos fragmentarios. En la India, investigadores, motivados por los eventos de la Segunda Guerra Mundial, ampliaron sus estudios sobre diez aceites vegetales con el objetivo de desarrollarlos como combustible doméstico. No obstante, estas investigaciones se detuvieron en la India cuando el combustible diésel a base de petróleo volvió a estar disponible en abundancia y a bajo costo. El acorazado Yamato utilizó aceite de soja refinado comestible como combustible en un búnker.

### 1.2.3 MEZCLAS DIESEL-ACEITE RESIDUAL DE PLÁSTICOS

Se han realizado múltiples investigaciones en torno al uso de combustibles alternativos (CA), principalmente existe literatura acerca de mezclas formadas por diésel y algún CA en distintos porcentajes, los cuales analizaron el comportamiento de los gases de efecto invernadero (GEI) en un proceso de combustión, como la investigación de Mani y coautores [7], donde analizaron las emisiones generadas por el uso de mezclas diésel-aceite de residuos plásticos (WPO) en un motor de combustión interna (CI), demostraron un aumento del 5% en las emisiones en comparación con el diésel comercial, cuanto mayor porcentaje de WPO contiene la mezcla las emisiones resultaron ser mayores, otro factor es la carga a la que se sometió el motor, a cargas

altas se generaron menos emisiones y a cargas bajas se generaron más emisiones.

También Kalagaris y coautores [8], mencionan que el uso de mezclas diésel-WPO en un motor CI tuvo un rendimiento óptimo sin importar el porcentaje de la mezcla, sin embargo, las mezclas de WPO tienen un retardo de encendido más prolongado, una presión máxima del cilindro más alta y una tasa de liberación de calor más alta, debido al índice de cetano más bajo. En el caso de todas las emisiones de NO<sub>x</sub>, HC, CO<sub>2</sub> y CO aumentaron en proporción de la mezcla más alta. Los resultados de las pruebas sugirieron para una combinación de 60 % - 70 % de WPO funcionando al 80 % - 90 % de la carga tuvo mejores resultados.

Singh y coautores [11] examinaron los parámetros ecológicos de un motor alimentado por una mezcla diésel-WPO a parámetros de trabajo variable. Demostraron que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaban a medida que aumentaba el porcentaje de contenido de WPO en las mezclas, mientras que las emisiones de NO<sub>x</sub> se redujeron con la alternativa del WPO.

Hussam y coautores [12] estudiaron la reducción de las emisiones de escape, incluidas las emisiones de ruido, mediante el uso de un aditivo oxigenado para el aceite plástico residual (WPO) en un motor diésel en el cual se mejoraron las emisiones de escape con las cinco mezclas WPO exceptuando las emisiones de NO<sub>x</sub>, el NO<sub>x</sub> aumentó debido al incremento de oxígeno de combustible adicional.

Wathakit y coautores [13] estudiaron el impacto del uso del aceite de residuos plásticos en un motor diésel de relación de compresión variable. Observando que el NO<sub>x</sub> y el CO<sub>2</sub> disminuye a medida que incrementan las cargas operativas del motor. Sin embargo, todas las emisiones fueron mayores para el aceite de residuos plásticos WPO por el tiempo de retardo de ignición, otro factor que influye en el aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub> para diésel y WPO fue el aumento de la relación de compresión variable, un índice de cetano más bajo y un porcentaje más alto de compuestos de carbono de cadena larga (C<sub>12</sub> - C<sub>20</sub>) dieron como resultado mayores emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y HC causadas por la combustión de WPO, así como la desventaja de las

emisiones por el uso de WPO puede aliviarse cuando el motor funciona con una alta carga operativa del motor y una alta relación de compresión.

Panda y coautores [14] estudiaron las características de emisiones del combustible diésel producido a partir de aceite plástico residual (WPO) obtenido por pirólisis catalítica de polipropileno residual. Demostraron un aumento en todas las emisiones, en el NOx puede deberse a un mayor retraso en el encendido debido a la presencia de compuestos de carbono de cadena larga en el combustible plástico, en los hidrocarburos puede deberse a la presencia de hidrocarburos insaturados que son irrompibles en el proceso de combustión, para el CO y el CO<sub>2</sub> puede deberse a un mayor consumo de combustible.

#### 1.2.4 MEZCLAS DIÉSEL-BIODIÉSEL

Una de las posibles soluciones que se dieron para resolver los efectos adversos de las emisiones generadas por un proceso de combustión en el sector del transporte por carretera es el uso de biodiésel como aditivo al combustible fósil. Se han realizado múltiples investigaciones para corroborar que el uso de este tipo de combustibles alternativos realmente favorece la reducción de las emisiones de GEI como lo hizo Mohammad y coautores [15], quienes estudiaron el comportamiento de las emisiones en una flota de autobuses en condiciones operativas reales con mezclas diésel-biodiésel, también realizaron una recopilación de diferentes estudios a lo largo del mundo observando una discrepancia entre cada uno de ellos en relación a las emisiones, donde en algunos casos las emisiones de NOx disminuían y en otros aumentaban, del mismo modo se esperaba que las emisiones de HC y PM se redujeran, así como las de CO y CO<sub>2</sub>, sin embargo, en cada uno de los estudios analizados se pueden presentar diferentes comportamientos dependiendo del lugar, la tecnología utilizada en cada uno de los autobuses, el conductor y las condiciones en las que se realizó la prueba.

Otro estudio realizado por Zhang y coautores [16] mostró el comportamiento de las emisiones utilizando una mezcla de diésel-biodiésel en autobuses urbanos, demostraron que B20 (diésel 100 %, biodiésel 20 %), en comparación con un D100 (diésel puro), reduce las tasas de emisión del autobús en número de partículas (PN) y material particulado (PM) en un 13.9 % y en un 24.3 % respectivamente, con control de crucero. En condiciones transitorias, B20 redujo las tasas de emisión de PN y PM en un 18.4 % y un 16.3 %, respectivamente.

Del mismo modo Martinez y coautores [17] estudiaron las emisiones en condiciones reales usando biodiésel de ultra baja densidad de carbono para un vehículo diésel liviano en el área metropolitana de Monterrey. Demostraron que todas las mezclas B20, B10 y B5 que utilizaron estuvieron por debajo del límite de la norma EURO 6, y para B5 presentó los mejores resultados para tres ciclos de conducción diferentes, velocidad de crucero baja, media y alta, y condiciones transitorias en términos de reducción de emisiones y consumo de combustible.

Las mezclas diésel-biodiésel son más comunes debido a que el biodiésel se considera una fuente sustentable, cerrando un ciclo de carbono en su fabricación. Los resultados obtenidos de la literatura consultada demuestran que el biodiésel tiende a la reducción de las emisiones, siendo así un buen aditivo logrando una reducción en el uso de combustibles fósiles.

### 1.2.5 MEZCLAS BIODIÉSEL-ACEITE DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Otro estudio realizado por Awang y coautores [5] que analizaron el efecto de la adición de biodiésel de aceite de palma (POB) en aceite plástico (WPO) sobre las emisiones en un motor diésel de CI. Demostraron que la mezcla WPO50 logra reducciones de HC en 37,21 % y WPO90 logra reducciones de CO<sub>2</sub> en 6,78 %, estas mezclas lograron los mejores resultados en comparación con con B10. Sin embargo, una mezcla de WPO-POB parece ser la mejor opción para motores diésel que no re-

quieren modificaciones en el motor porque presentaron menores emisiones y mejores características de desgaste.

También se ha demostrado que WPO mezclado con POB es un buen sustituto del diésel, siendo WPO90 la mejor combinación de combustible secundario con un gran potencial para el rendimiento del motor diésel. Se examinaron las ventajas del POB, como el alto contenido de O<sub>2</sub> en la concentración en las moléculas de combustible. La presencia de O<sub>2</sub> en las moléculas de combustible ayuda a mejorar los procesos de combustión en términos de rendimiento y emisiones.

### 1.2.6 MEZCLAS TERNARIAS DIÉSEL-ACEITE DE RESIDUOS PLÁSTICOS Y ADITIVOS

Otra investigación realizada por Sekar y coautores [9] estudiaron el comportamiento de las emisiones de un motor diésel alimentado con nanocatalizador (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Al) y aceite de pirolisis producido a partir de residuos plásticos (WPO) sólidos utilizando un reactor de tornillo. Demostrarón que con la adición de el nanopartículas en concentración de 25 ppm y un 25 % de WPO se presentó una reducción en las emisiones del 45 % de HC y 60 % de CO. Por otro lado el NO<sub>x</sub> la emisión se redujo en un 15 % respecto al WPO puro y un 9 % respecto al diésel comercial, estas reducciones en las emisiones fueron consecuencia principalmente por la mayor oxidación generada por el aumento del compuesto de oxígeno mediante la adición del nanocatalizador.

Kumar y coautores [18] estudiaron las características de rendimiento, combustión y emisión del biodiesel de pescado mezclado con residuos de aceite plástico en un motor Kumar y coautores estudiaron las características de rendimiento, combustión y emisión del biodiesel de pescado mezclado con residuos de aceite de plástico en un motor de un solo cilindro conectado a un dinamómetro, compararon los resultados de las mezclas diésel al 100 % (D100), diésel 80 %-biodiésel 20 % (B20FOME), respectivamente y diésel 70 % -biodiésel 20 % - aceite de residuos plásticos 10 %

(B20FOME10WPO), demostrando un aumento en la temperatura de los gases de escape para B20FOME10WPO, sin embargo B20FOME y D100 tienen un comportamiento similar. Para el caso de los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) que presentan un aumento proporcional al aumento de la carga en el motor teniendo para una carga del 100 % 1110 ppm para B20FOME10WPO, 1080 ppm para B20FOME y 1050 ppm para D100. Las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) disminuyeron por el incremento de oxígeno en el combustible, provocando una reacción de combustión más completa cuando el motor se encuentra con una carga del 50 % que se encuentra en un rango de 0.0 % a 0.1 % de CO, posteriormente las emisiones incrementan para una carga del 100 % situándose la emisión en el rango de 0.2 % a 0.3 % de CO. Para los hidrocarburos sin quemar (HC) para una carga del motor de 100 % las emisiones se reducen en un 14.2 % para B20FOME y 24.1 % para B20FOME10WPO

### 1.3 HIPÓTESIS

En el análisis de las emisiones de gases contaminantes en un proceso de combustión en un motor Diesel usando dos combustibles alternativos, WPO100 y una mezcla WPO80WCO20 (aceite de residuos plásticos 80 - aceite residual de cocina 20) en un circuito urbano a bajas velocidades en el área metropolitana de monterrey, se espera que presenten un comportamiento semejante al usar WPO100 en comparación al diésel comercial, así como una reducción de las emisiones de CO y  $CO_2$  con la adición del biocombustible en WPO, sin embargo, se espera un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno con el aumento de la proporción de oxígeno en la mezcla.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener el análisis de los resultados experimentales de las emisiones generadas en un proceso de combustión en un motor diésel para una mezcla de residuos plásticos-Biodiésel en un circuito urbano, para comparar su comportamiento con distintos porcentajes de mezcla.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con el análisis de las emisiones contaminantes en las que intervengan los combustibles WPO y Biodiésel.
- Puesta a punto de la instalación experimental.
- Elaborar una matriz de ensayos, en la que se definen los combustibles que se usarán, así como los porcentajes de mezclas y ruta a seguir.
- Llevar acabo las pruebas experimentales ceñidas a la matriz de ensayos diseñada.
- Analizar las emisiones contaminantes formadas durante el proceso de combustión de la mezcla.
- Comparar los resultados obtenidos y dar las conclusiones de la presente investigación.
- Redacción del documento final.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

La investigación en circuitos urbanos demuestran el verdadero comportamiento de las emisiones generadas en un proceso de combustión a diferencia de las pruebas en dinamómetros que intentan reproducir las condiciones reales de manejo que no representan necesariamente la realidad en circuitos de ruta y las emisiones de las mismas. El uso de combustibles alternativos (CA) como el combustible WPO-WCO (aceite de residuos plásticos - aceite de residuos de cocina) que por el cambio en la materia prima que se utiliza para la fabricación atañe problemáticas importantes en la liberación de emisiones a la atmósfera. Las principales razones en la importancia del uso de estos CA es que se obtiene de productos vegetales para el biodiésel y desechos de plástico para el caso del WPO disminuyendo los gases de efecto invernadero en el proceso de combustión para motores diésel.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Los motores de combustión interna (CI) tienen como objetivo generar potencia mecánica mediante la conversión de la energía química presente en el combustible. En estos motores, la liberación de energía se realiza mediante la combustión u oxidación del combustible dentro de la unidad. Tanto la mezcla de aire y combustible previa a la combustión como los productos resultantes después de la combustión actúan como fluidos de trabajo reales en el sistema. Las transferencias de trabajo, que son responsables de producir la potencia deseada, se llevan a cabo directamente entre estos fluidos de trabajo y los componentes mecánicos del motor. La combustión tiene lugar dentro de la sección dedicada a la producción de trabajo, lo que conlleva a que el diseño y las características operativas de estos motores difieran fundamentalmente de otros tipos de motores. La clasificación de los motores térmicos se puede realizar de la siguiente manera:

1. Por sus aplicaciones de motores CI son en automóviles, camiones, locomotoras, avionetas, sector marino, sistemas de energía portátil y generación de energía.

2. Por su estructura elemental del motor, los motores alternativos (clasificados a su vez según la disposición de los cilindros, como en línea, en V, radiales, opues-

tos, entre otros) y los motores rotativos (como el Wankel y otras geometrías) son componentes fundamentales.

3. Por el tipo de ciclo operativo, se distinguen los motores según el ciclo de cuatro tiempos, que puede ser de aspiración natural (que incorpora aire atmosférico), sobrealimentado (que introduce una mezcla fresca precomprimida) y turbo alimentado (que admite una mezcla fresca a través de un compresor impulsado por una turbina de escape).

4. Por su diseño y la disposición de las válvulas o puertos, los motores pueden clasificarse en válvulas en cabeza (o también llamado cabeza en I), válvulas debajo de la cabeza (o cabeza en L), válvulas rotativas, puertos de barrido cruzado (donde los puertos de entrada y escape están en lados opuestos del cilindro en un extremo), puertos de barrido en bucle (donde los puertos de entrada y escape están en el mismo lado del cilindro en un extremo) y barrido de flujo continuo o uniflujo (con puertos de entrada y escape, o válvulas, en diferentes extremos del cilindro).

5. Por el tipo de combustible utilizado, se pueden distinguir motores que funcionan con gasolina (o derivados del petróleo), fueloil (o diésel), gas natural, gas licuado de petróleo, alcoholes (como metanol y etanol), hidrógeno y combustibles duales.

6. Por el procedimiento de preparación de la mezcla, se pueden clasificar los motores en carburación, inyección de combustible en los puertos de admisión o colector de admisión, y inyección de combustible directamente en el cilindro del motor.

7. Por el modo de iniciar la combustión, se pueden distinguir motores con encendido por chispa (SI), ya sea en motores convencionales con mezcla uniforme o en motores de carga estratificada donde la mezcla es no uniforme, y encendido por compresión (CI), presente en motores diésel convencionales, así como en motores de gas mediante la inyección inicial de fuel oil.

8. Por el diseño de la cámara de combustión, los motores se pueden clasificar

en aquellos con cámara abierta (como disco, cuña, semiesfera o cuenco en el pistón) y cámara dividida (que incluye cámaras auxiliares de tamaños variados, con numerosos diseños como cámaras de turbulencia y antecámaras).

9. Por el método de control de carga, se refiere a restringir simultáneamente el flujo de combustible y aire con el fin de mantener esencialmente constante la composición de la mezcla.

10. Por el método de enfriamiento. Enfriado por agua, enfriado por aire.

### 2.1.1 CICLO DE OPERACIÓN DEL MOTOR.

El desplazamiento del pistón se realiza en un cilindro mediante un movimiento alternativo hacia adelante y hacia atrás, transmitiendo energía mediante una biela y un mecanismo de manivela al eje impulsor. La rotación continua de la manivela provoca un movimiento cíclico del pistón. Este se detiene tanto en la posición superior central del cigüeñal (TC) como en la posición inferior central del cigüeñal (BC) cuando el volumen del cilindro es mínimo o máximo, respectivamente. La cantidad mínima de volumen en el cilindro se conoce como volumen de espacio muerto. La diferencia entre el volumen total o máximo y el volumen de espacio muerto, que representa el espacio barrido por el pistón, se denomina volumen desplazado o barrido. La relación entre el volumen máximo y el volumen mínimo se define como la relación de compresión (RC). Los valores típicos de RC oscilan entre 8 y 12 para motores de encendido por chispa (SI) y entre 12 y 24 para motores de encendido por compresión (CI). La mayoría de los motores alternativos operan bajo el conocido ciclo de cuatro tiempos, con cada cilindro necesitando cuatro desplazamientos de su pistón, lo que equivale a dos revoluciones completas del cigüeñal para llevar a cabo la secuencia de eventos que resulta en una carrera de potencia Figura 2.1 y 2.2 .

## 2.1.2 COMPONENTES DEL MOTOR

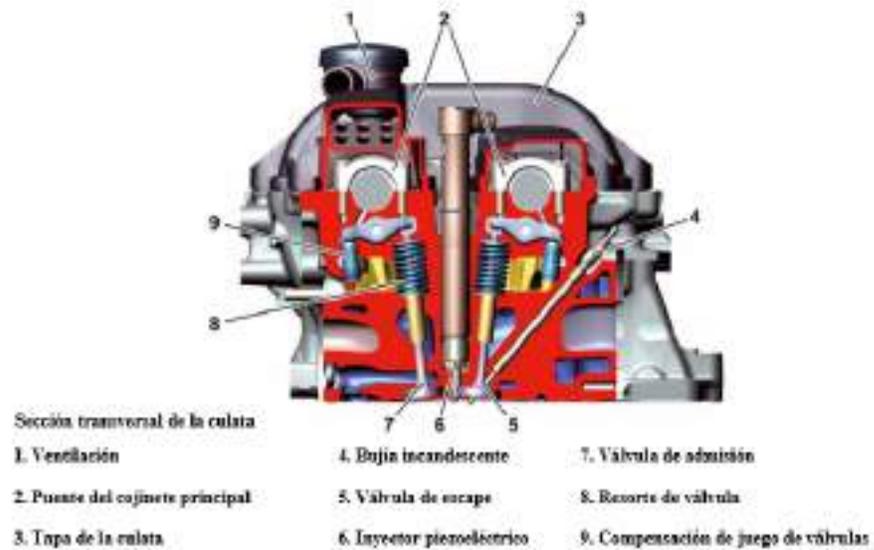


FIGURA 2.1: Componentes principales de un motor Diesel.

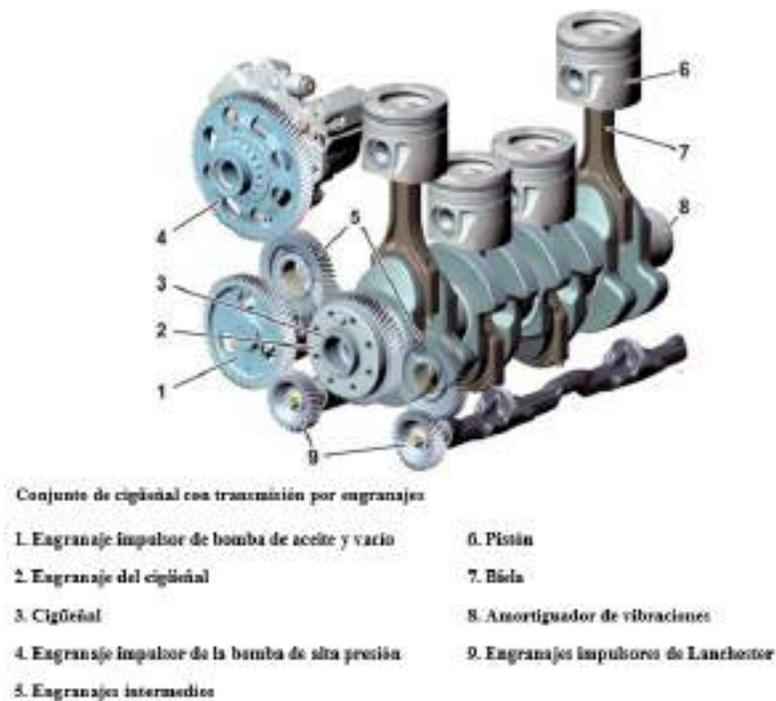


FIGURA 2.2: Conjunto de cigüeñal con transmisión por engranajes.

### 2.1.3 OPERACIÓN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

En los motores de encendido por compresión, se introduce exclusivamente aire en el cilindro. El combustible se inyecta directamente en el cilindro del motor justo antes de que comience el proceso de combustión. La variación en la cantidad de combustible inyectado en cada ciclo controla la carga, mientras que el flujo de aire a una velocidad dada del motor permanece esencialmente constante. Existen diversos diseños de motores de encendido por compresión que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como automóviles, camiones, locomotoras, embarcaciones y generadores de energía. Estos motores pueden ser de aspiración natural, donde se introduce aire atmosférico, o turboalimentados, donde el aire de entrada se comprime mediante un sistema de escape.

Es común encontrar motores que incorporan tanto una turbina como un compresor, así como motores sobrealimentados en los cuales el aire es comprimido mediante una bomba o un soplador accionados mecánicamente. La turboalimentación y la sobrealimentación tienen como objetivo incrementar la potencia del motor al aumentar el flujo de masa de aire por unidad de volumen desplazado, lo que permite un aumento correspondiente en el flujo de combustible. Estos métodos, generalmente utilizados en motores de mayores dimensiones, contribuyen a reducir el tamaño y el peso del motor para una potencia de salida específica. Con excepción de los motores más pequeños, el ciclo de dos tiempos compite eficazmente con el ciclo de cuatro tiempos, principalmente debido a que en el ciclo diésel, solo se pierde aire en el proceso de barrido de cilindros.

La relación de compresión en los motores diésel es notablemente más elevada que los valores típicos de los motores de encendido por chispa (SI), oscilando entre 12 y 24 dependiendo del tipo de motor diésel y si este es de aspiración natural o turboalimentado. Los tiempos de válvulas utilizados son similares a los de los motores de encendido por chispa. Durante la carrera de admisión, se introduce aire a una

presión cercana a la atmosférica y se comprime a una presión de aproximadamente 4 MPa (600 lb/in<sup>2</sup>) y una temperatura de alrededor de 800 K. La inyección de combustible en el cilindro del motor comienza alrededor de 2 pulgadas antes de llegar al punto muerto superior (TC). En este momento, el chorro de combustible líquido se atomiza en gotas, arrastrando consigo el aire. El combustible líquido se evapora y se mezcla con el aire en proporciones combustibles, donde tanto la temperatura como la presión del aire superan el punto de ignición del combustible. Posteriormente, tras un breve periodo de demora, la auto ignición de partes de la mezcla no uniforme de combustible y aire inicia el proceso de combustión. La presión del cilindro aumenta por encima del nivel del motor sin ignición y la llama se propaga rápidamente a través de la porción del combustible inyectado que ya se ha mezclado adecuadamente con el aire para ser inflamable. A medida que avanza la expansión, persiste la mezcla entre el combustible, el aire y los gases en llamas, con una combustión más intensa. A carga completa, la masa de combustible inyectado representa aproximadamente el 5 por ciento de la masa de aire en el cilindro. Sin embargo, los niveles crecientes de humo negro en el escape limitan la eficiencia de la combustión. El proceso de escape se asemeja al del motor de encendido por chispa de cuatro tiempos. Al finalizar la carrera de escape, el ciclo se reinicia. En el ciclo del motor de encendido por compresión de dos tiempos, los procesos de compresión, inyección de combustible, combustión y expansión son similares a sus equivalentes en el ciclo de cuatro tiempos; lo que difiere son las presiones de admisión y escape. En los motores con barrido en bucle, los puertos de entrada y salida están ubicados en el mismo extremo del cilindro y se exponen cuando el pistón se aproxima a la posición inferior central (BC). Tras abrirse los puertos de escape, la presión del cilindro disminuye rápidamente en un proceso de purga. Los puertos de entrada se abren y, cuando la presión del cilindro cae por debajo de la presión de entrada, el aire fluye hacia el cilindro. Los gases quemados, desplazados por este aire fresco, continúan saliendo por el puerto de escape, junto con una porción del aire fresco. Una vez cerrados los puertos, el pistón inicia la compresión, seguida por la inyección de combustible, la mezcla de combustible y aire, la combustión y la expansión.

## 2.2 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

### 2.2.1 BIOCOMBUSTIBLES INTRODUCCIÓN

Los reguladores, legisladores, los grupos ambientalistas promueven el uso de la innovación en el sector automotriz, impulsando la idea de la innovación de los vehículos en términos de tecnología. Según las normativas vigentes las emisiones de los vehículos se miden desde el tubo de escape, sin embargo, es una idea engañosa pensar que se resuelve el problema simplemente actualizando la tecnología en los motores de combustión interna, teniendo en cuenta que las emisiones se crean en otros lugares durante el ciclo de vida de un vehículo. Al comprender las emisiones acumuladas para diferentes vías de descarbonización, es posible elegir correctamente la mejor estrategia para avanzar hacia una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) más bajas en general del transporte. Los estudios de análisis de ciclo de vida de las innovaciones en motores, ya sea una transformación directa de motores de combustión interna a motores eléctricos, así como la mejora de los procesos dentro de los motores de combustión interna, pueden reducir los GEI. Sin embargo, los combustibles alternativos han demostrado tener emisiones de GEI aún más bajas [19].

En los Estados Unidos de América (EUA) en 2019, el 80 % de las emisiones de GEI fueron CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> es un producto de la combustión completa cuando un combustible de hidrocarburo se quema con el aire. A medida que se quema más combustible, se produce más dióxido de carbono y viceversa. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) establece que por cada galón de gasolina (3.78 L) quemado, 19.89 libras (8.88 kg) de CO<sub>2</sub>, por lo que un vehículo de gasolina típico producirá 392 lbs (178 kg) de CO<sub>2</sub> por tanque lleno de combustible. Un diésel produce aproximadamente un 15 % más de CO<sub>2</sub> por volumen de combustible quemado. En la figura 2.3, vemos que el 82 % de las emisiones del sector del transporte en

los EUA son generadas por automóviles de pasajeros (vehículos livianos) y vehículos comerciales (vehículos medianos y pesados). Este análisis destaca la necesidad de centrarse en el sector del transporte al considerar la reducción de GEI.

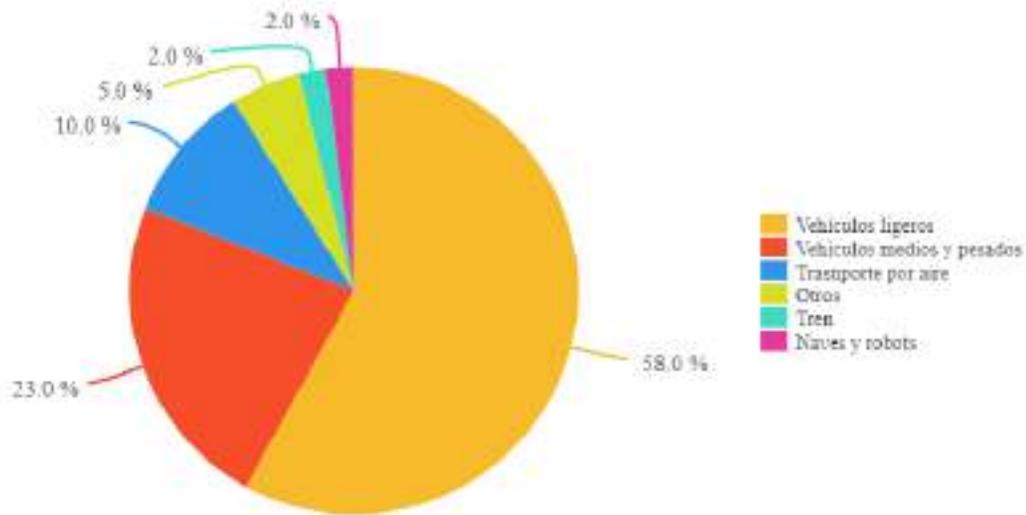


FIGURA 2.3: Proporción de las emisiones de GEI del sector del transporte de EUA (U.S. EPA 2021a)

### 2.2.2 BIODIÉSEL

En la búsqueda de la reducción de la huella de carbono provocada por el sector del transporte se buscan combustibles alternativos, el biodiésel (ésteres metílicos de ácidos grasos) que se deriva de los triglicéridos por transesterificación con metanol es una alternativa, ya que es el análogo renovable del diésel de petróleo, los biocombustibles como es el caso del biodiésel tienen varias ventajas, por ejemplo, proceden de fuentes renovables y pueden producirse a partir de cultivos energéticos no alimentarios y ofrecen la posibilidad de generar nuevos mercados para los productores del sector agropecuario, otra ventaja sobresaliente a notar es que no contengan azufre y nitrógeno en su composición a diferencia de los combustibles fósiles y pueden introducirse en los motores de combustión interna con ajustes mínimos o sin ningún

cambio por debajo del 10 % del volumen total de la mezcla [20].

Existe una gran variedad de biodiésel, estos son dependiendo de la materia prima a utilizar, se pueden generar a partir de distintos vegetales, de animales y de aceites usados. Se han desarrollado varios procesos para la producción de combustible biodiésel, entre los cuales la transesterificación mediante catálisis alcalina proporciona altos niveles de conversión de triglicéridos a sus correspondientes ésteres metílicos en cortos tiempos de reacción. Por lo tanto, este proceso se ha utilizado ampliamente para la producción de combustible biodiesel en varios países. [21].

El aceite de residuos de cocina (WCO, por sus siglas en inglés) a escala urbana es la materia prima más sostenible para promover los sistemas de producción y consumo de biodiesel, tanto por razones económicas como ambientales. Las propiedades fisicoquímicas de este tipo de aceite podrían representar un reto técnico para optimizar los procesos de transformación y depuración, principalmente por el contenido de ácidos grasos libres y agua, y también porque al contrario de los aceites frescos o refinados, WCO es una mezcla de diferentes aceites vegetales, y su composición particular depende del tipo de aceites consumidos localmente.

### 2.2.3 ACEITE RESIDUAL DE PLÁSTICO

La contaminación del suelo, aire y agua proveniente del uso de productos a base de petróleo como lo son los diversos tipos de plásticos, ha tenido un crecimiento exponencial por la sobreproducción de plásticos, para satisfacer la necesidad de la población que sigue creciendo desmesuradamente. Los plásticos son un material asequible, versátil, flexible y ligero, lo que lo convierte en una elección común para la fabricación de una amplia gama de productos en diversos sectores como el hogar, el comercio, la industria, la agricultura, la construcción, la automoción, entre otros. Sin embargo, el incremento en la utilización de estos productos ha generado un aumento en la generación de residuos plásticos, y su descomposición lenta plantea una

sería amenaza para el medio ambiente. Se estima que en América Latina y el Caribe, el 12 % de los residuos sólidos urbanos son plásticos y, a pesar de los importantes avances que se han logrado en la gestión de residuos, la región aún enfrenta muchos desafíos que requieren atención especial, como las bajas tasas de recuperación de residuos sólidos urbanos, que son menos del 4 %. La correcta eliminación de los residuos junto con el proceso de reciclaje ayuda a reducir la contaminación generada. Además, permite revalorizar los recursos no renovables para dejar de verlos como simples desechos y comenzar a tenerlos en cuenta como un recurso importante en la producción de combustible líquido, siendo así una posible solución a dos problemas importantes, reducir la contaminación por plásticos y disminuir el uso de combustibles de origen fósil como lo es el diésel. Las normas ASTM D 5033 y ASTM D 7209 proponen la reducción de residuos, la recuperación de recursos y el uso de materiales y productos poliméricos reciclados mediante métodos mecánicos o térmicos [22].

El método que ha presentado mejores resultados comparado con el reciclado es el proceso de pirólisis catalítica, la pirólisis es un proceso de craqueo térmico que se produce en ausencia de oxígeno a temperaturas superiores a 400 °C. Este proceso térmico descompone las moléculas de polímero de cadena larga en moléculas más pequeñas y menos complejas a través del calor y reacciones químicas.

La pirólisis es una conversión termoquímica de material orgánico y no orgánico (plásticos, madera, algas, desechos de pescado, neumáticos de desecho, petróleo crudo pesado, etc.) en ausencia de oxígeno. Sobre la base de la temperatura y la velocidad de calentamiento, la pirólisis se clasifica en:

- Lenta, baja temperatura (100>300 °C), baja velocidad de calentamiento y alto tiempo de residencia de sólidos).
- Rápida, temperatura moderada (500 - 600 °C), velocidad de calentamiento rápida (100 °C/s) y tiempo de residencia de vapor corto (menos de 2 s).
- Flash, alta temperatura (>600 °C), velocidad de calentamiento rápida (>200 °C/s), y tiempo de residencia de vapor corto.

La pirólisis rápida produce hasta un 75 % de rendimiento líquido, que tiene una amplia variedad de aplicaciones [23].

En el proceso pirolítico, no es necesario llevar a cabo la clasificación ni la purificación de las diversas categorías de desechos plásticos, permitiendo además abordar el tratamiento de desechos contaminados. Variados investigadores han examinado el potencial de la pirólisis térmica en la gestión de desechos plásticos mixtos, especialmente aquellos conformados por una combinación de polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE), que son ampliamente reconocidos como los más prevalentes en el mercado. [24].

## 2.3 ESTÁNDARES PARA LA REGULACIÓN DE EMISIONES

Los estándares de emisión son una de las principales herramientas para lograr la reducción de las emisiones generadas por el sector automotriz que representa el 20 % de las emisiones globales de efecto invernadero. Este tipo de regulaciones establecen límites obligatorios en las tasas de emisiones promedio.

Se tienen diferentes regulaciones a lo largo del mundo, tomando como referencia a los países desarrollados los cuales son los mayores productores de automóviles, así como los mayores exportadores de vehículos a lo largo del mundo y los que tienen la mayor población del sector automotriz en sus calles.

Los ciclos de manejo son principalmente condiciones transitorias y los métodos de prueba son complejos por lo que se requiere un equipo cada vez más preciso. Por lo tanto, muchos de los primeros países en implementar dichos estándares han adoptado el sistema estándar de Estados Unidos de América (EUA). Debido a la singularidad de sus Estados miembros la Unión Europea (UE) tiene regulaciones relativamente flexibles para las emisiones de los vehículos, aunque los métodos y equipos de prueba son relativamente simples. Por lo tanto, la mayoría de los países en desarrollo, incluida China, han hecho referencia al sistema estándar de la UE. Japón implementó una legislación temprana sobre emisiones de vehículos y tecnología de control avanzada, se considera un sistema regulatorio independiente y ha sido adoptado por sólo unos pocos países.

La normatividad en México, se ha basado principalmente en las normas de la Unión Europea (Euro) y la de Estados Unidos de América (EPA).

### 2.3.1 ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

En 1991 se emitieron los estándares de nivel 1, el nivel 2 (Tabla 2.1) se implementó de manera similar en el año 2004 a 2009. Siguiendo los estándares Tier 1, Tier 2 y Tier 3 se estableció como regla final en 2014, con un calendario de implementación gradual entre 2017 a 2025.

Los estándares Tier 1 son aplicables a todos los vehículos ligeros nuevos, cuyo peso bruto nominal (PBN) sea inferior a 3855.5 kg. Tier 2 es aplicable a un mayor rango de emisiones de vehículos livianos a vehículos de pasajeros medianos con un PBN total entre 3855.5 kg y 4535.9 kg. Tier 3 es aplicable a un mayor número de vehículos incluidos los de carga pesada con un PBN de hasta 6350.3 kg. Dependiendo de los límites de emisión, las emisiones Tier 2 se estructuran en 11 niveles, 8 de los cuales son permanentes y 3 temporales [25].

	Vida Intermedia (5 años / 50000 millas)					Vida útil completa (10 años / 120000 millas)				
	[mg / milla]					[mg / milla]				
	NMOG	CO	NO <sub>x</sub>	PM	HCHO	NMOG	CO	NO <sub>x</sub>	PM	HCHO
<b>Contenedores temporales</b>										
11	-	-	-	-	-	280	7300	900	120	-
10	125	3400	400	-	15	156	4200	600	80	-
9	75	3400	200	-	15	90	4200	300	60	-
<b>Contenedores permanentes</b>										
8	100	3400	140	-	15	280	7300	900	120	-
7	75	3400	110	-	15	90	4200	150	20	-
6	75	3400	80	-	15	90	4200	100	10	-
5	75	3400	50	-	15	90	4200	70	10	-
4	-	-	-	-	-	-	2100	40	10	-
3	-	-	-	-	-	-	2100	30	10	-
2	-	-	-	-	-	-	2100	20	10	-
1	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0

TABLA 2.1: Estándar de emisión para un vehículo de carga ligero: Tier 2 (EUA)

### 2.3.2 UNIÓN EUROPEA

El problema de la contaminación es un tema mundial por que del mismo modo que se hizo en EUA la Unión Europea implementó su propia normativa siendo esta más simple de interpretar por lo cual la mayoría de países se basan en ella, Europa emitió el reglamento ECE15 en 1970, que desde entonces se ha ido modificando cada determinado tiempo (3 a 4 años). Euro 1 se implementó en 1992, redujo significativamente los límites de emisión y revisó las especificaciones experimentales al ciclo de prueba extra urbano (EUDC) + EUDC (suburbano). Los límites de emisión para EURO 2 que se implementaron en 1996 siguieron disminuyendo, lo que dio lugar a que se implementara una mejora en los motores como lo fue el catalizador de tres vías.

En las normas Euro 3, que se implementaron en el año 2000, ya no se combinó el control de CO y  $NO_x$ , más bien a cada uno se le dio un límite respectivo. Al mismo tiempo, para garantizar el cumplimiento de los vehículos en uso, se agregaron varios elementos de prueba de certificación, como una prueba de emisiones de arranque en frío a baja temperatura, inspección de la función del sistema de diagnóstico a bordo y consistencia de emisiones internas del vehículo de 80,000 km. Europa implementó el estándar Euro 4 en 2005. Implementó el estándar Euro 5 en 2009. En 2013, se implementó el estándar Euro 6.

La norma Euro 6 actual entró en vigor en septiembre de 2014. En comparación con el límite Euro 5 de 180 mg/km para  $NO_x$  en vehículos diésel, el límite Euro 6 se redujo en un 55,6% a 80 g/km; HC +  $NO_x$  disminuyó un 14,5%, de 230 a 170 mg/km, mientras que los límites de CO, PM y número de partículas (PN) no cambiaron, permaneciendo en 500 mg/km, 50 mg/km, respectivamente [25].

Tipo de vehículo	Etapa	Fecha de implementación	Límites [mg/km]					
			CO	HC	$NO_x$	HC + $NO_x$	PM	PN
Encendido por compresión	Euro - 1	07 / 1992	272	-	-	970 (213)	140	-
	Euro - 2 IDI	01 / 1996	1000	-	-	700	80	-
	Euro - 2 DI	01 / 1996	1000	-	-	960	100	-
	Euro - 3	01 / 2000	640	-	500	560	50	-
	Euro - 4	01 / 2005	500	-	250	300	25	-
	Euro - 5a	09 / 2009	500	-	180	230	5.0 / 4.5	-
	Euro - 5b	09 / 2011	500	-	180	230	5.0 / 4.6	6.00E+11
	Euro - 6b	09 / 2014	500	-	80	170	5.0 / 4.7	6.00E+11

TABLA 2.2: Estándar de emisión para vehículos ligeros: Euro (EU)

### 2.3.3 MÉXICO

La normativa mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017 establece los límites máximos permitidos para las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos sin quemar (HC), combinación de hidrocarburos sin quemar y óxidos de nitrógeno ( $NO_x+HC$ ), partículas (PM) y amoníaco provenientes de los escapes de motores nuevos que emplean diésel como combustible. Esta norma aplica tanto a motores destinados a la propulsión de vehículos automotores con un peso bruto vehicular superior a 3,857 kilogramos como a los escapes de vehículos automotores nuevos con un peso bruto vehicular superior a 3,857 kilogramos que estén equipados con dichos motores.

Indica que los vehículos automotores recién fabricados que emplean diésel como fuente de energía producen sustancias contaminantes al ambiente, por lo cual es esencial controlar sus emisiones. Se fundamenta en la comprobación de que dichas emisiones contienen agentes contaminantes que impactan negativamente en la calidad del aire, afectando de esta manera la salud pública.

Los valores máximos permitidos para las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos (HC), la combinación de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (HC +  $NO_x$ ) y partículas (PM) provenientes de los

escapes de motores y vehículos nuevos con un peso bruto vehicular superior a 3,857 kg, certificados a través de los procedimientos de evaluación establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, están detallados en la Tabla.2.3.

Estándar	Método de prueba	CO	$NO_x$	HCNM		Part
				[g/bhp-hr]		
1A	CT y CSE	15.5	No aplica	No aplica	2.4	0.10
1AA	CT y CSE	15.5	1.2	0.14	No aplica	0.01
1B	CT y CSE	15.5	0.20	0.14	No aplica	0.01

TABLA 2.3: Límites máximos para vehículos nuevos: Métodos CT y SCE

Los valores máximos permitidos para las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos no quemados (HC), partículas (PM), número de partículas (PN) y amoníaco ( $NH_3$ ), provenientes de los escapes de motores y vehículos automotores recién fabricados con un peso bruto vehicular superior a 3,857 kilogramos, certificados a través de los procedimientos de evaluación establecidos por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, así como por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, están detallados en la Tabla 2.4.

Estándar	Método de prueba	CO	$NO_x$	HC	HCNM	Part	Núm. Part	NH#
2A	CEEC	1.5	3.5	0.46	No aplica	0.02	No aplica	No aplica
	CET	4		No aplica	0.55	0.03	No aplica	No aplica
2AA	CEEC	1.5	2.0	0.46	No aplica	0.02	No aplica	No aplica
	CET	4.0	2.0	No aplica	0.55	0.03	No aplica	No aplica
2B	CEEMAP	1.5	0.4	0.13	No aplica	0.01	8.0E+11	10
	CETMAP	4.0	0.46	0.16	No aplica	0.01	6.0E+11	10

TABLA 2.4: Límites máximos para vehículos nuevos: Métodos CEEC y CET

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

La metodología presentada en esta investigación consta tanto de herramientas experimentales, así como de herramientas estadísticas utilizadas para llevar a cabo el desarrollo del análisis de las emisiones generadas por un motor de combustión interna. El desarrollo de la metodología se muestra en la Figura 3.1.



FIGURA 3.1: Diagrama metodología

Dentro de la metodología se habla en un principio de la obtención y propiedades de los combustibles utilizados, describiendo los procedimientos utilizados, así como indicando la materia prima de la que fueron desarrollados. Posteriormente se habla de las herramientas experimentales, las cuales constan de todos aquellos instrumentos

utilizados dentro de la instalación experimental, la cual es descrita más adelante dentro de este capítulo. Seguido a las herramientas experimentales, se encuentran las herramientas estadísticas las cuales sirven para el análisis de los datos obtenidos en las pruebas realizadas.

### 3.1 ACEITE DE RESIDUOS PLÁSTICOS (WPO)

Para la obtención del WPO se utilizó materia prima que consta principalmente de polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). Se realizó un proceso de pirolísis a la materia prima como se explica a continuación.

En primer lugar, los residuos mixtos se sumergieron en un tanque con agua a  $4^{\circ}\text{C}$  ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) para separar los residuos plásticos de las partículas de polvo y materias extrañas contenidas en la mezcla. Luego, la mezcla de residuos plásticos libres de polvo y material extraño se introdujo en un recipiente con una mezcla de alcohol etílico y agua para separar el HDPE. Finalmente, las fracciones separadas se colocaron en una estufa a  $120^{\circ}\text{C}$  durante 8h para evaporar los residuos de agua y alcohol.

El proceso pirolítico para la obtención del combustible se lleva a cabo en un reactor semi continuo de 2L construido en acero inoxidable y revestido con un calentador eléctrico. Las temperaturas se midieron usando termopares tipo K y se registraron usando la tarjeta NI 9213 de National Instrument. Para todos los experimentos, el termopar se colocó en la parte superior del reactor, se utilizó como sensor de control para la regulación del calentador eléctrico. La velocidad de calentamiento se controló con una precisión de  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y la temperatura de consigna a  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$  por derivada integral proporcional. El sistema de condensación estaba compuesto por dos condensadores y dos tanques, y los productos gaseosos no condensables llegaban a una trampa de gases donde eran lavados como se muestra en la Figura 3.2.

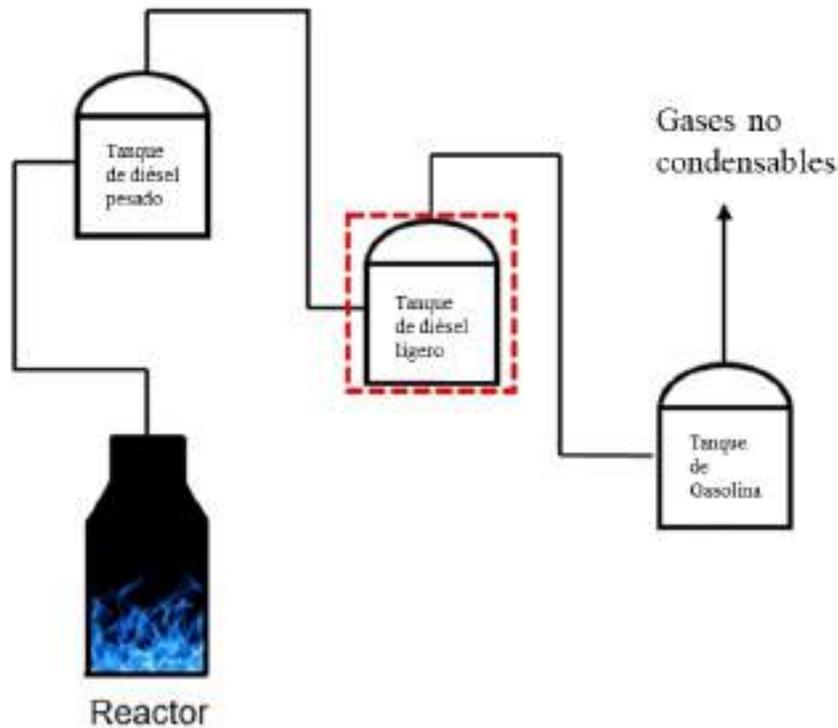


FIGURA 3.2: Proceso pirolítico

Las fracciones de aceite líquido y sólido se estimaron con base a su masa. La masa de la fase gaseosa ( $m_g$ ) se determinó a partir del balance de masas como la diferencia entre la masa de la materia prima ( $m_p$ ), la masa total de la fase líquida ( $m_{fl}$ ), y la masa de los residuos sólidos ( $m_{rs}$ ) como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$m_g = m_p - (m_{fl} + m_{rs}) \quad (3.1)$$

La influencia de la velocidad de calentamiento y la temperatura en el rendimiento del proceso pirolítico se evaluó a través de un diseño experimental multinivel. Las temperaturas varían en un rango de 380–460°C y las tasas de calentamiento fueron variadas de 10°C/min, 19°C/min y 28°C/min. Como variables de respuesta se definieron las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas. Para determinar las propiedades físicas del combustible se llevaron a cabo distintas pruebas bajo la norma ASTM.

Las propiedades fisicoquímicas del WPO se muestran en la Tabla 3.1.

Propiedades	Referencia	Diésel	WPO
Densidad a 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	ASTM D1298	816.9 ±0.1	796.6 ±0.8
Viscosidad cinemática a 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	ASTM D445	2.243 ±0.160	2.973 ±0.024
Punto inicial de ebullición °C		188.4 ±2.4	153.7 ±12.8
T 10°C		200.6 ±6.6	198.9 ±3.8
T 50°C	ASTM D86	246.0 ±2.1	267.3 ±0.7
T 90°C		309.0 ±0.2	343.4 ±1.3
Punto final de ebullición °C		334.9 ±2.9	349.0 ±2.2
Valor calorífico superior [MJ/kg]	ASTM D240	45.72 ±0.01	46.16 ±0.03
Número de cetano	ASTM D4737	54.58 ±0.01	74.16 ±0.01
C7 - C10 [%wt]		36.22 ±0.01	17.25 ±0.01
C11 - C14 [%wt]	Conteo de carbono por cromatografía	52.87 ±0.01	39.44 ±0.01
C15 - C30 [%wt]		10.95 ± 0.01	43.26 ± 0.01

TABLA 3.1: Propiedades fisicoquímicas del diésel y WPO

## 3.2 ACEITE DE RESIDUOS DE COCINA (WCO)

El biodiesel se produjo a través de una reacción de transesterificación utilizando una relación molar de metanol a aceite de 6:1. De acuerdo con la tecnología IPN-GBD-1000VR, WCO se calentó en un reactor químico de acero inoxidable con aislamiento térmico de 1000 L con bobina interna, camisa con hoyuelos y calentadores eléctricos de inmersión equipados con un agitador, un intercambiador de calor de tubos-carcasa y un sistema de vacío. Se mezcló metanol con un catalizador base al 1 % en peso con respecto al WCO en un tanque agitado a temperatura ambiente. Esta tecnología se caracteriza por no utilizar agua de lavado y la energía necesaria para calentar el sistema de reacción se realiza mediante calentadores eléctricos de inmersión. Para determinar las propiedades físicas del combustible se llevaron a cabo distintas pruebas bajo la norma ASTM. Las propiedades físicas del WCO se muestran en la Tabla 3.2.

Propiedades	Referencia	Diésel	Biodiésel
Densidad a 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	ASTM D1298	816.9 0.1	880.5 0.7
Viscosidad cinemática a 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	ASTM D445	2.243 0.160	5.321 0.050
Punto inicial de ebullición °C		188.4 2.4	149.1 2.8
T 10°C		200.6 6.6	210.3 2.6
T 50°C	ASTM D86	246.0 2.1	293.0 0.6
T 90°C		309.0 0.2	334.6 2.4
Punto final de ebullición °C		334.9 2.9	388.2 3.3
Valor calorífico superior [MJ/kg]	ASTM D240	45.72 0.01	44.54 0.03
Número de cetano	ASTM D4737	54.58 0.01	59.89 0.01
C7 - C10 [%wt]		36.22 0.01	1.20 0.01
C11 - C14 [%wt]	Conteo de carbono por cromatografía	52.87 0.01	0.38 0.01
C15 - C30 [%wt]		10.95 0.01	97.22 0.01

TABLA 3.2: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel y diésel

### 3.3 HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

La configuración experimental diseñada en la presente investigación se muestra en la Figura 3.3, que está conformado por un sistema analizador de gases el cual será el encargado de obtener las concentraciones de las distintas partículas de gases contaminantes mediante los dos métodos que tiene integrados el analizador de gases MAHA MET 6.3, un sistema de suministro de combustible portátil para poder ser montado y desmontado con facilidad, un sistema portátil de alimentación y un sistema de adquisición de datos.

En la presente investigación se utilizó un vehículo de prueba Mercedes Sprinter Van 415-CDI extra larga, que cuenta con un motor Diesel modelo OM-651, el vehículo de prueba se seleccionó por la particularidad de sus características mostradas en la Tabla 3.3.

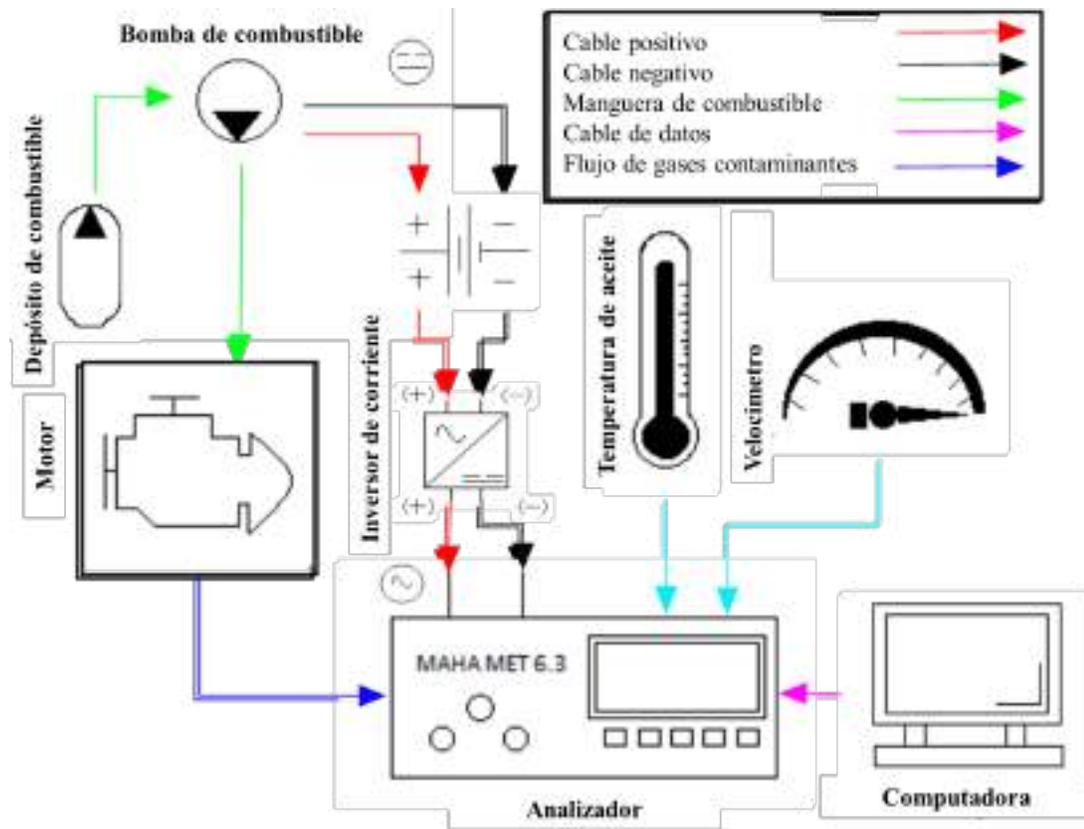


FIGURA 3.3: Esquema de la instalación experimental

### 3.3.1 SISTEMA ANALIZADOR DE GASES (MAHA MET 6.3)

Es una herramienta diseñada para evaluar las emisiones contaminantes de un motor de combustión interna, proporcionando información sobre la proporción en la que estas se encuentran en el sistema de escape. El MET 6.3 (Figura 3.4) cuenta con dos sistemas de detección de partículas, uno de ellos es la espectrometría infrarroja, la cual consiste en la generación de una luz infrarroja que es absorbida por algunas de las partículas que cuentan con esta cualidad como el CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO y NO<sub>2</sub>, siendo posible detectar la presencia de los gases, midiendo el equivalente de la luz infrarroja absorbida en una onda particular de energía infrarroja que pasa a través de las células contenidas en la mezcla de un gas. El MAHA MET 6.3 cuenta con un filtro óptico formado por un lente que permite pasar sólo las longitudes de onda del espectro infrarrojo correspondientes a cada uno de los gases que se busquen medir,

Vehículo de prueba	
Parámetro	Valor
Tipo de vehículo	LDDV
Modelo del vehículo	Sprinter Van 415 - CDI
Año del modelo	2015
Kilometraje [Km]	125 969
Masa total [Kg]	5000
Modelo del motor	OM 651
Potencia del motor [Kw]	150
Desplazamiento del motor [L]	2 143
Estándar de emisión	Euro 3, Sistema convertidor catalítico, sistema filtrador de partículas y sistema de recirculación de gases de escape
Sistema de inyección	Riel común / inyector piezoeléctrico controlado directamente
Presión máxima de inyección [bar]	2000

TABLA 3.3: Principales características del vehículo de prueba

posteriormente la luz es registrada por un fototransistor enviando una señal eléctrica a circuitos amplificadores que indicaran la cantidad de concentración de cada uno de los gases en un display.



FIGURA 3.4: Analizador de gases combinado MAHA MET 6.3

El segundo sistema es el de detección electroquímica, que es apropiado para

determinar el contenido de oxígeno. En este método, las moléculas de oxígeno presentes en los gases de combustión atraviesan una membrana permeable al gas hasta llegar al cátodo. Debido a su composición material, se produce una reacción química en el cátodo, generando iones OH. Estos iones se desplazan hacia el ánodo a través del electrolito, generando un flujo de corriente proporcional a la concentración de O<sub>2</sub>. La caída de tensión desarrollada en una resistencia ubicada en el circuito se utiliza como señal de medición para el posterior procesamiento electrónico.

Los datos técnicos y de medición del MAHA MET 6.3 se muestran en la Tabla 3.4, donde se muestran las dimensiones del equipo, la alimentación que necesita, el peso, así como las concentraciones de las distintas partículas a medir.

El MAHA MET 6.3 Está conformado por los siguientes componentes como se muestra en la Figura 3.5, los cuales son integrados a la instalación experimental.



FIGURA 3.5: Componentes que conforman el sistema completo del analizador MAHA MET 6.3

A Comprobador combinado MET 6.3

B Filtros

### Datos técnicos

Alimentación de tensión	110 - 230V 50 / 60 Hz
Conexión de tensión a bordo	10 - 30V DC
Dimensiones	406 X 225 X 160 mm
Peso	5 Kg
<b>Célula de medición analizador de gases</b>	
Gases medibles	HC, CO, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub>
Espectrometría infrarroja	HC, CO y CO <sub>2</sub>
Detección electroquímica	O <sub>2</sub>
<b>Concentración de masa de partículas</b>	
CO	+/- 0.02 % abs
CO <sub>2</sub>	+/- 0.3 % abs
HC	+/- 4 ppm abs
O <sub>2</sub>	+/- 0.02 % abs
NO	+/- 5 ppm abs
NO <sub>2</sub>	+/- 20 ppm abs

TABLA 3.4: Datos técnicos y de medición MAHA MET 6.3

C Suministro de energía

D Sensor de temperatura

E Cable LAN

F Manual de operación

G Sonda de muestreo con tubo de 200 cm + sonda de 60 cm

H Sello de tubería para prueba de estanqueidad

I Acoplamiento del tubo de la sonda

J Junta de repuesto, extractor de agua

K Depósito de condensados

La conexión de los distintos componentes del sistema de análisis de gases se llevó a cabo con el siguiente orden.

1. Se coloca el analizador de gases en una base en la parte posterior de la camioneta, fijado de manera en que las vibraciones del vehículo en movimiento no afecte el funcionamiento del equipo.
2. Se conecta al suministro de energía, se asegura para que no exista alguna falla eléctrica.
3. Se conecta el cable LAN a un equipo de computo para el registro de los datos obtenidos de los gases de escape.
4. Se conecta la sonda de muestreo directamente en el tubo de gases de escape de la camioneta.

### 3.3.2 SISTEMA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE

Se diseñó un sistema externo para tener un control exacto del combustible que se utilizó durante las pruebas experimentales. El sistema cuenta con un depósito de 10L conectado al sistema de inyección y de retorno de combustible del motor mediante una manguera AIRE GATES 19B 3/4 250 LBS, así mismo cuenta con una bomba de baja presión a 200 psi que será la encargada de suministrar el combustible a lo largo de todo el sistema como se muestra en la Figura 3.6.

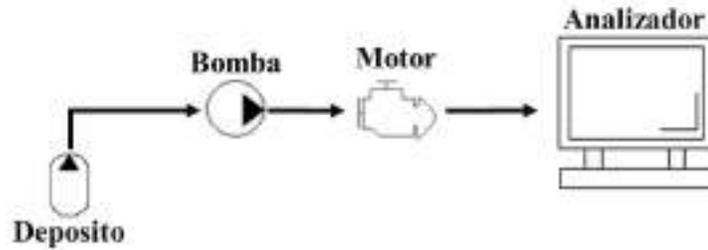


FIGURA 3.6: Sistema de suministro de combustible

### 3.3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Se instaló un sistema externo para energizar los equipos que se utilizan para la adquisición de datos, se instaló un inversor de corriente directa a corriente alterna (Inversor de corriente Schumacher 750W POWER CONVERTER) conectado a la batería de la camioneta. Se instaló un interruptor para activar y desactivar la bomba de suministro de combustible como se muestra en la 3.7. Las conexiones se realizaron con cables de calibre 8 awg.

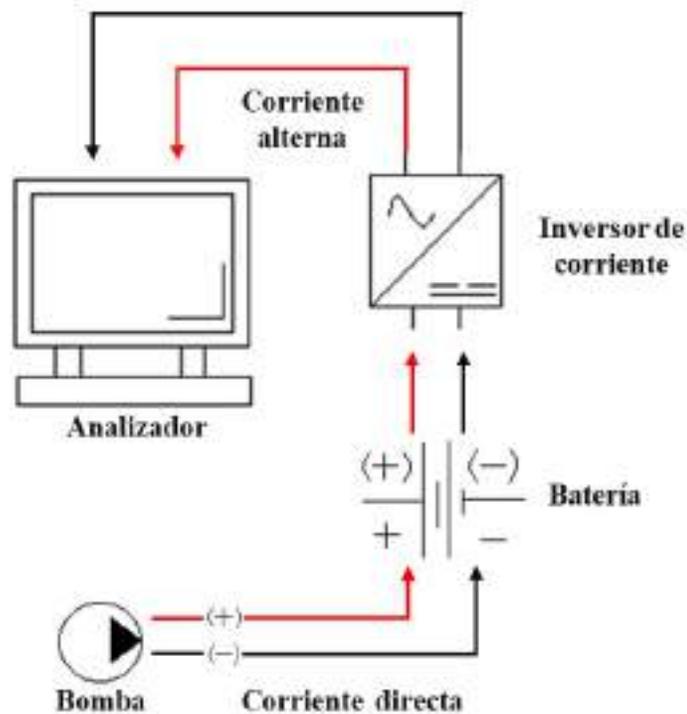


FIGURA 3.7: Sistema de suministro de energía eléctrica

### 3.3.4 PROTOCOLO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se adecuó una camioneta tipo van Sprinter CDI - 415 Mercedes Benz con la instrumentación mencionada en el presente capítulo, a continuación se menciona el proceso de la puesta a punto de la instalación experimental:

- **Sistema de alimentación eléctrico portátil:** En la zona del conductor parte inferior del asiento, se procede a remover el tapete de protección de la batería del vehículo, removiendo de igual manera los tornillos tipo torx que se encuentran en la tapa del recipiente que resguarda la batería. se conectan dos circuitos independientes a la batería de la camioneta; uno para la bomba de suministro de combustible que cuenta con un interruptor para su encendido y apagado, otro para el inversor de corriente (donde se conecta la extensión que alimenta de energía al analizador y computadora que se encuentran en la parte posterior de la camioneta)
- **Sistema alterno de suministro de combustible:** En la parte inferior externa de la camioneta se encuentran las conexiones de la bomba de suministro de combustible, la tubería de suministro de combustible, así como la de retorno de combustible, se procede a desconectar todo el sistema para dar lugar a las conexiones del sistema portátil verificando que no exista fuga alguna. Posteriormente se introducen las mangueras por la parte inferior del asiento del conductor, ya dentro de la camioneta se conecta la manguera de suministro de combustible directamente a la bomba y la de retorno al bidón de almacenamiento portátil el cual cuenta con un sistema a tierra.
- **Sistema analizador de gases:** En la parte posterior de la camioneta, se instala una base donde se coloca el analizador de gases, mediante una manguera y una lanceta conectada al tubo de gases de escape, posteriormente se conectó el sensor de temperatura del aceite, el cual va conectado directamente en el motor, se conectó la alimentación del analizador así como la alimentación de

la computadora y un cable de red para la transferencia de datos analizador - computadora.

- **Prueba de funcionamiento:** Se enciende la bomba para de inmediato encender la camioneta y verificar que todo funcione con normalidad.

### 3.3.5 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

Para obtener una ubicación aproximada dentro del circuito de ruta en un determinado momento, se utilizó la aplicación Geo tracker Figura 3.8. El sistema de posicionamiento global utiliza una red de 30 satélites, que se conectan con el teléfono obteniendo los datos de posición de por lo menos tres de ellos realizando una triangulación con la posición del teléfono.



FIGURA 3.8: Logotipo de la aplicación Geo tracker

Los datos recabados por el sistema de posicionamiento global como la longitud, la latitud y la elevación son fundamentales en el cálculo de la distancia real recorrida tomando en cuenta el ángulo de elevación y la curvatura de la tierra.

### 3.3.6 MATRIZ EXPERIMENTAL

El diseño de la matriz experimental se basó en los circuitos de ruta para bajas velocidades, así como las concentraciones de las mezclas que fueron definidas con base en la literatura, las concentraciones de mezclas se muestran en la Tabla 3.5.

Circuito	Combustible	Proporción
Baja velocidad [10 - 40 km / h] [Aceleración - Desaceleración - Realenti]	Diésel	100
	WPO	100
	WPO - WCO	80 - 20

TABLA 3.5: Matriz experimental

Los valores que se tomaron de velocidad para ralenti están en el rango de 0 - 10 km/h, para el circuito de baja velocidad se consideraron los rangos de velocidad de 10 - 20 km/h, 20 - 30 km/h y 30 - 40 m/h dentro del área metropolitana de Monterrey como se muestra en la Figura 3.9.

En ambos circuitos de ruta el análisis se realizó en función del tipo de aceleración, tomando en cuenta cuando el vehículo está sin acelerar, cuando el vehículo está acelerando y cuando el vehículo se desacelera.



$$EF_i = 1000 \cdot \frac{\sum(ER_{ij} \cdot FD_j)}{\sum V_m} \quad (3.2)$$

Donde:

i: Tipo de contaminante.

j: Número de ficheros (VSP).

$ER_{ij}$ : Tasa de emisión del contaminante i en el fichero  $j^{th}$  VSP - bin.

$FD_j$ : Porcentaje de puntos de muestreo en el fichero i en  $j^{th}$  VSP - bin.

$V_m$ : Velocidad del vehículo.

### 3.4.2 POTENCIA ESPECIFICA DEL VEHÍCULO:

La potencia específica (VSP) se define convencionalmente para definir la potencia instantánea del motor del vehículo. Es utilizada en la determinación de las emisiones vehiculares del modelo MOVES de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), puede reducir la influencia de la diferencia de las condiciones de operación de diferentes pruebas sobre los factores de emisión [26], el cálculo de la potencia específica del vehículo se realizó mediante la ecuación Ecuación 3.3.

$$VSP = \left(\frac{A}{M}\right) \cdot v + \left(\frac{B}{M}\right) \cdot v^2 + \left(\frac{C}{M}\right) \cdot v^3 + (a + g \cdot \text{sen}\theta) \cdot v \quad (3.3)$$

Donde:

A: Coeficiente de resistencia de arrastre.

B: Término rotativo.

C: Coeficiente de arrastre.

M: Masa del vehículo.

v: Velocidad.

a: Aceleración.

g: Gravedad.

sen  $\theta$ : Ángulo de inclinación del recorrido.

### 3.4.3 TASAS DE EMISIÓN

A partir de los datos obtenidos del analizador de gases MAHA MET 6.3 estos se relacionan directamente con los puntos de muestra recabados por el sistema de posicionamiento global con base en la matriz experimental que se encuentra referida a velocidades y aceleraciones se realizará el análisis de datos mediante el cálculo de las tasas de emisión (Ecuación 3.4) de cada uno de los gases generados por el proceso de combustión de la siguiente forma:

$$ER_i = Q \cdot \rho_i \quad (3.4)$$

Donde:

$ER_i$ : Tasas de emisión de las diferentes partículas.

Q: Caudal volumétrico de muestreo del analizador.

$\rho_i$ : Densidad de las distintas partículas a 80°C.

Dado que el análisis se realizará en condiciones basadas en la velocidad y la aceleración, se tomaron en cuenta para el cálculo de las tasas de emisión generadas en velocidad ( $N_{i,v}$ ) y en aceleración ( $N_{i,a}$ ), teniendo así la forma, como se muestran en la ecuación 3.5 y 3.6 respectivamente:

$$ER_i = \frac{ER_{i,vi}}{N_{vi}} \quad (3.5)$$

$$ER_i = \frac{ER_{i,ai}}{N_{ai}} \quad (3.6)$$

Donde:

$ER_i$ : Tasa de emisión.

$N_{vi}$ =Número de datos en velocidad.

$N_{ai}$ =Número de datos en aceleración.

Los datos obtenidos del analizador de gases son arrojados en unidades porcentuales y en partes por millón, para el análisis posterior en la comparación con las normativas establecidas anteriormente se requiere que los datos se manejen en [mg/s].

#### 3.4.4 DISCRETIZACIÓN DE DATOS

La discretización de datos en el presente estudio incluye la conversión de formato, el cálculo de diversas variables, la separación de datos en diferentes categorías y la obtención de factores de emisión por velocidad y aceleración.

El proceso de discretización de datos comienza con la conversión del formato de los datos obtenidos por el sistema de posicionamiento global. Se convierte el formato GPX a xlsx para obtener los puntos de muestra que proporciona el GPS. Posteriormente, se lleva a cabo un primer tratamiento en excel en el que se añadieron fórmulas para el cálculo de diversas variables como Delta phi, Delta lambda, phi radian, lambda radian, distancia Haversine, distancia con elevación, tiempo recorrido, distancia recorrida, velocidad y aceleración, con el objetivo de describir el movimiento del vehículo en las condiciones del circuito de ruta. Seguidamente se relacionan los datos adquiridos por el GPS y los datos adquiridos del MAHA, a continuación se calculan las tasas de emisión para cada una de las secciones recorridas mediante las ecuaciones mencionadas anteriormente.

En el cálculo de los factores de emisión se reorganizaron los datos de velocidad y aceleración, para así tener las condiciones de baja velocidad, las condiciones de

crucero, de aceleración y de desaceleración.

#### 3.4.4.1 CÁLCULO DE VARIABLES

Para el cálculo de la distancia entre dos puntos situados en la esfera terrestre se requiere de una latitud y una longitud relacionadas en función de la curvatura terrestre mediante la ecuación de Haversine (Ecuación 3.7).

$$d = 2 \cdot r \cdot \arcsen \sqrt{\text{sen}^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos(\phi_2) \text{sen}^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)} \quad (3.7)$$

Donde :

$\phi_1$  y  $\phi_2$ : Es el dato de latitud expresada en radianes de los datos 1 y 2.

$\lambda_1$  y  $\lambda_2$ : Es el dato de longitud expresado en radianes de los puntos 1 y 2.

r: Es el radio medio de la tierra en metros

La ecuación 3.7 describe una distancia lineal entre dos puntos.

Para el tratamiento posterior se toma en cuenta la diferencia de elevación entre un punto y otro, haciendo uso del Teorema de Pitágoras para el cálculo de la distancia con elevación ( $d_e$ ), como se muestra en la Ecuación 3.8:

$$d_e = \sqrt{d^2 + dif_e^2} \quad (3.8)$$

Donde:

$d_e$ : Distancia con elevación.

d: Distancia Haversine.

$dif_e$ : Diferencia de elevación.

El cálculo del factor de emisión se realiza con base en velocidades las cuales fueron calculadas mediante la distancia que se recorrió en un lapso de tiempo, se determina la velocidad que existe entre cada uno de los puntos de muestreo como se muestra en la Ecuación 3.9.

$$v = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (3.9)$$

$d_2 - d_1$ : Distancia recorrida entre un punto y otro.

$t_2 - t_1$ : Tiempo transcurrido de un punto a otro

A continuación se realiza el cálculo de la aceleración que se tuvo entre un punto de muestreo y otro, relacionando la diferencia de las velocidades en función de la diferencia del tiempo entre dos puntos como se muestra en Ecuación 3.10.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (3.10)$$

Donde:

$v_2 - v_1$ : Diferencia de velocidades

$t_2 - t_1$ : Diferencia de tiempo

#### 3.4.4.2 CORRELACIÓN DE DATOS EXCEL - MATLAB

Una vez calculadas las variables, se crea un nuevo archivo en el cual se transcriben los datos de tiempo [s], distancia Haversine [m], distancia con elevación [m], diferencia de tiempo [s], tiempo recorrido [s], distancia recorrida [m], velocidad [km/h] y aceleración [ $m/s^2$ ] del archivo del primer tratamiento en la hoja 1 que tiene por nombre "Trayecto" (datos obtenidos del GPS). De la misma manera se transcriben los datos de hora, concentración de partículas, así como las concentraciones de las

emisiones (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) en una hoja 2 que tiene por nombre “Maha” (datos obtenidos del analizador). Finalmente, se transcriben los datos de concentración de partículas y las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y temperatura del aceite (°C) en una hoja 3 que tiene por nombre “Emisiones”. El nuevo archivo xlsx se procesó en un código desarrollado en el software Matlab mediante una media estadística con la finalidad de conseguir una correlación de datos, logrando que para cada dato del GPS tengamos la cantidad proporcional de la concentración de cada gas emitido, esto debido a que existen entre 9 y 11 datos de emisiones para un dato de posicionamiento. Mediante una marca de tiempo que proporciona un único valor a los datos del GPS para así poder crear una relación directa con los valores del analizador asignándole la misma marca de tiempo para cada valor, de esa forma promediando los datos del analizador. Teniendo de esta forma un valor de concentración para cada uno de los gases en un periodo de tiempo y una distancia recorrida en un lapso de tiempo.

#### 3.4.4.3 FICHEROS VSP

Dentro de la ecuación 3.2 se requieren ficheros de datos de VSP organizados en rangos dependiendo del comportamiento del vehículo tomando referencias de velocidad en rangos, primero de 0 km/h - 5 km/h, de 5 - 15 k/h como 10 km/h, de 15 km/h - 25 km/h como 20 km/h, de 25 km/h - 35 km/h como 30 km/h, de 35 km/h - 45 km/h como 40 km/h y de 45 km/h - 55 km/h como 50 km/h, los datos de los conjuntos de velocidades son los que se ingresan dentro de la ecuación 3.3 sustituyendo la variable 'v'.

Resolviendo la ecuación 3.3 para cada dato del nuevo archivo obtenido en la correlación matlab - excel, relacionando las variables de velocidad, masa del vehículo, aceleración, los coeficientes (A,B,C) y un ángulo de inclinación, se puede determinar si se suministraba energía en la misma dirección al trabajo (cuando el vehículo se acelera) o si la energía esta siendo transferida en dirección opuesta (cuando el

vehículo se desacelera). Para la selección de la cantidad de ficheros que se consideran en la presente investigación, se tomó como referencia los rangos considerados en el modelo MOVES, estos rangos son los idóneos para tener un un valor de VSP en un rango específico dependiendo de las condiciones que tengamos en el recorrido.

Las condiciones de funcionamiento del vehículo se dividieron en cuatro secciones, incluida la desaceleración ( $a < -0.1m/s^2$ ), velocidad crucero ( $-0.1m/s^2 > a > 0.1m/s^2$ ), aceleración ( $a > 0.1m/s^2$ ) y velocidad baja ( $0km/h - 50km/h$ ), el VSP se divide en 12 tramos desde  $-50kw/ton$  hasta  $50kw/ton$  tomando el tramo 1 desde  $-50kw/ton - 25kw/ton$  y el tramo 12 desde  $25kw/ton - 25kw/ton$ , dejando los demás tramos en intervalos de  $5KW/ton$ .

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

### 4.1 FACTOR DE EMISIÓN Y TASA DE EMISIÓN A BAJAS VELOCIDADES

La Figura 4.1 muestra el factor de emisiones para D100, WPO100 y WPO80B20 a bajas velocidades, el material particulado para D100 muestra una tendencia a disminuir su concentración al aumentar la velocidad, esto debido a las temperaturas más bajas que se encuentran en el motor y al aumento gradual de la temperatura conforme incrementa la velocidad, logrando una mejora en el proceso de la quema de combustible en el motor [27]. Al comparar las emisiones entre los combustibles D100 y WPO100 podemos observar una disminución del 26.9 % a 10 km/h, 14.16 % a 20 km/h, 6.3 % a 30 km/h y 9.45 % para 40 km/h al usar sólo WPO100; esta tendencia también fue reportada por Hussam y coautores [12], quienes observaron que al aumentar el porcentaje de WPO en la mezcla diésel - aceite de plástico la concentración de PM se redujo. Esto está asociado al aporte de oxígeno por parte del WPO, lo cual ayuda a la mejora del proceso de combustión y la quema del PM; sin embargo, para los valores de la mezcla WPO80WCO20 aumentaron las emisiones de PM a las velocidades de 20 y 30 km/h con 31.34 % y 38.88 %, respectivamente.

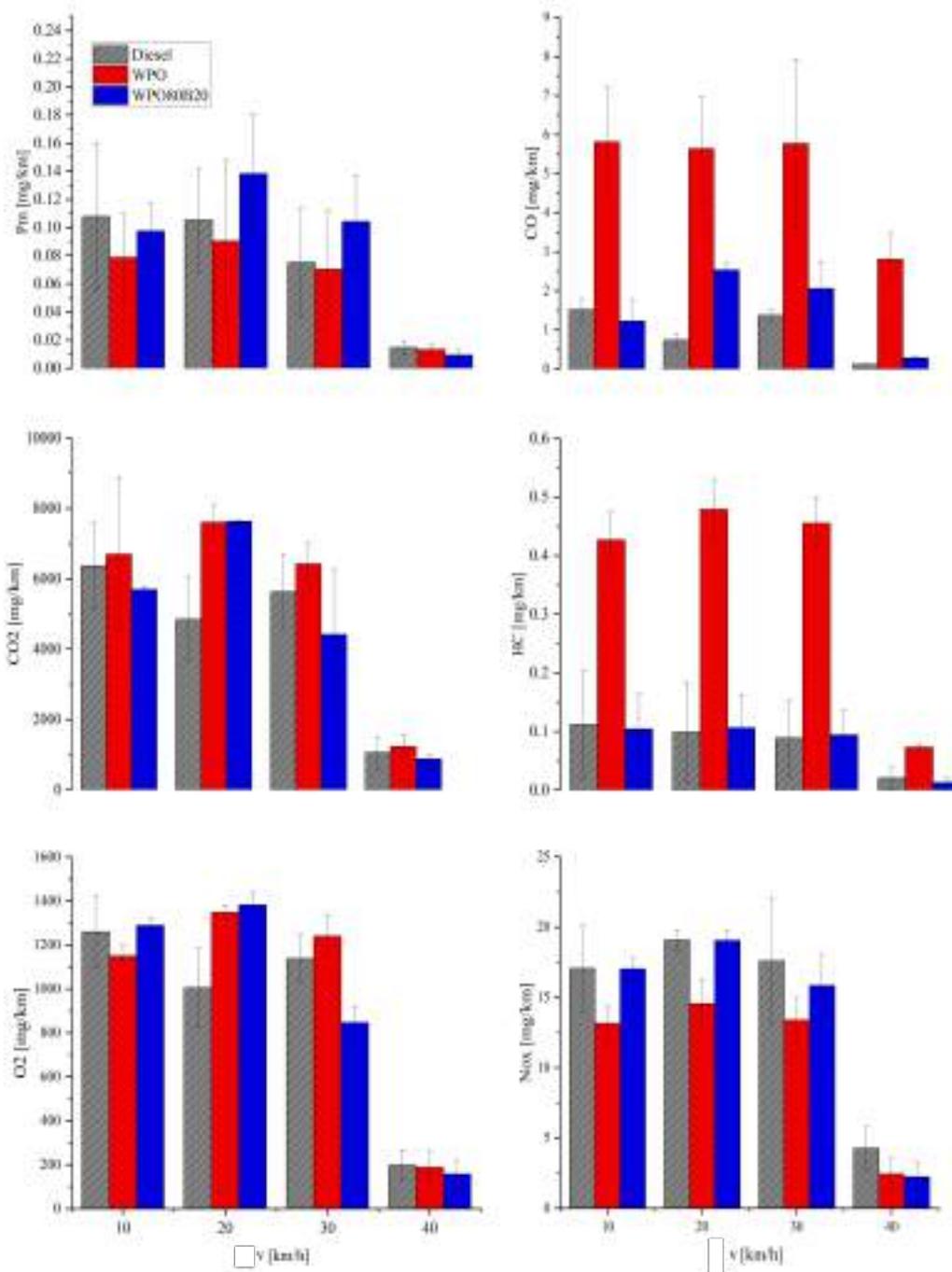


FIGURA 4.1: Factor de emisión para D100, WPO100 y WPO100B20, a bajas velocidades

Este comportamiento de incremento en las emisiones de PM generadas por la mezcla puede deberse al aumento de la viscosidad y de moléculas más pesadas añadidas por el WCO como lo menciona Sekar y coautores [9], y para las velocidades de 10 km/h y 40 km/h que presentaron una disminución de 9.58 % y de 36.54 %, respectivamente. Con respecto a los tres combustibles utilizados podemos observar que la mezcla WPO - WCO tiene mayores emisiones de PM a 30 km/h en comparación con el WPO y el diésel, y el WPO en todas las velocidades se presenta como el combustible que genera menor PM, esto puede deberse a sus propiedades físicas, principalmente su menor valor en tensión superficial que ayuda al proceso de atomización y mejora el proceso de combustión.

Las emisiones de CO para D100 presentan una tendencia a disminuir; sin embargo, en 30 km/h se presenta un aumento, y en 40km/h se presenta una notable reducción de emisiones de CO; el WPO presentó un aumento bastante considerable en comparación con el D100 (decir tantas veces aumento). Esto se debe a la quema incompleta del combustible y al gran numero de hidrocarburos presentes en el WPO según Sekar y coautores [9]. De igual manera Awang y coautores [28] relacionan el aumento de las emisiones de CO con la oxidación parcial de los átomos de carbono presentes en el combustible, así como la relación aire combustible la cual presenta un déficit de aire al quemarse en los cilindros del motor.

Se puede observar que el uso de la mezcla WPO80WCO20 provoca una disminución en los valores de los factores de emisión de CO en un 78 %, 55 %, 64 % y en 89 % para las velocidades de 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, respectivamente en comparación al WPO. De acuerdo con ELKelawy y coautores [29], el añadir un 50 % de biodiésel en una mezcla con diésel causa una reducción de las emisiones de CO, atribuyendo este comportamiento al alto contenido de oxígeno en la mezcla aportado por el biodiésel; esto podría explicar la significativa reducción de las emisiones de CO en la mezcla WPO80WCO20.

El factor de emisión de  $CO_2$  en D100 muestra un comportamiento similar al del

factor de emisión CO, donde a 30 km/h es afectada la tendencia de disminución, de igual forma a 40 km/h se puede observar una disminución significativa en las emisiones de  $CO_2$ . El WPO100 presenta un aumento de  $CO_2$  del 5.3 %, 56.9 %, 14.05 % y 16.57 % a las velocidades de 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, respectivamente en comparación con el diésel. Es importante hacer énfasis en el contraste entre el comportamiento del CO al emplear WPO100 y los valores mostrados para el  $CO_2$  también usando WPO100; para el primero un alto valor de factor de emisión indica un mal proceso de combustión como se describió anteriormente, y para el segundo un alto valor de factor de emisión significa una mejora en el proceso de oxidación de los carbonos del combustible. Para el  $CO_2$  se tiene un mejor proceso de combustión debido a sus propiedades fisicoquímicas, como una menor tensión superficial, menor viscosidad y un mayor número de cetano. Otro factor que influye en este comportamiento es el número de carbonos presentes en cada combustible, el aumento en las emisiones de  $CO_2$  se debe a la mayor relación de C:H en el WPO100 (C:H = 10:34) en comparación a la del diésel (C:H = 6:47), lo cual provoca que para la misma cantidad de energía liberada por la combustión se oxide más carbono, provocando una mayor generación de  $CO_2$  de acuerdo con lo observado por Kalargaris y coautores [8] y Mangesh y coautores [30].

La presencia del WCO en una mezcla WPO80WCO20 ayuda significativamente en la reducción de las emisiones generadas por el WPO100 y D100, provocando un comportamiento de reducción en las emisiones de  $CO_2$  a excepción de la velocidad a 20km/h donde presentó un aumento insignificante en la emisiones con respecto a WPO100 y un aumento del 57 % con D100. Se muestra una reducción de 10 %, 21 % y 17 % a las velocidades 10 km/h, 30 km/h y 40 km/h, respectivamente en comparación con el diésel, y de 14 %, 31 % y de 28 % a las velocidades 10 km/h, 30 km/h y 40km/h, respectivamente en comparación con el WPO100. En relación al WPO100 se puede interpretar que la reducción de  $CO_2$  se debe a una oxidación de los carbonos menos eficaz debido al aumento de la viscosidad presente en el WCO. Awang y coautores [28], reportaron una tendencia de crecimiento simultaneo en las emisiones de CO y

$CO_2$  a 1500 y 1800 RPM para el caso de la mezcla directamente proporcional a la de este trabajo WPO80B20, demostrando el mismo comportamiento donde ambas emisiones crecen a distintas velocidades.

El factor de emisión para HC muestra una tendencia a disminuir conforme aumenta la velocidad para D100 y WPO80WCO20 donde a 40 km/h se muestra una reducción más significativa que las otras. El caso contrario se muestra en las emisiones de WPO donde se muestra un incremento bastante considerable en relación a los otros dos combustibles, este comportamiento puede ser justificado por la larga cadena de carbonos presentes en el WPO como lo demuestran Whathaki y coautores [13]; quienes hacen mención que debido a los compuestos de carbono de cadena larga (C12 - C20) dieron como resultado mayores emisiones de HC. A pesar de que el WPO100 utilizado en esta investigación presenta propiedades fisicoquímicas que ayudarían a que el proceso de combustión sea más eficaz, quedan residuos de carbono sin quemar explicando el aumento para WPO como lo reportan Kaewbuddee y coautores [31]. Asimismo, estos autores muestran la variación de HC encontrando mayores valores de emisiones de HC con la combustión del WPO en comparación con el D100, de igual forma mencionan que al añadir un biodiésel se puede contribuir con la reducción de las emisiones de HC, lo que resulta en niveles más bajos de emisión, teniendo el mismo comportamiento en el presente trabajo, donde las emisiones de HC se reducen en un 75 %, 77 %, 79 % y 82 % a las velocidades de 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h y 40 km/h, respectivamente en comparación con WPO100 al usar WPO80WCO20.

Se puede observar de igual forma en la Fig. 4.1 el comportamiento del factor de emisión para el  $NO_x$  donde influye el contenido de oxígeno de cada uno de los combustibles en el proceso de combustión, esto debido a que al existir una mayor cantidad de oxígeno se logra una mejora en la quema de cada uno de los combustibles, sin embargo, al mejorar el proceso de combustión se generan altas temperaturas dentro de la cámara de combustión favoreciendo la generación de  $NO_x$ . Los altos valores de diésel son mayores que los combustibles de prueba alternativos para todas las velocidades, esto puede deberse al alto contenido de oxígeno que contiene el lote

de diésel usado en la presente investigación. La tendencia de los  $NO_x$  debería ser más alta para la mezcla con biocombustible por su alto contenido de oxígeno, sin embargo, se puede notar una reducción con respecto al diésel comercial para todas las velocidades

## 4.2 FACTOR DE EMISIÓN Y TASA DE EMISIÓN EN DISTINTAS CONDICIONES DE ACELERACIÓN

La inspección detallada de las Figuras 4.3 y 4.4 que representan la emanación de factores de emisión de diversos combustibles (D100, WPO 100 y WPO80WCO20) bajo diferentes escenarios de aceleración, se puede observar un panorama complejo y acelerador sobre como las propiedades inherentes de los combustibles influyen en las emisiones durante el funcionamiento de un motor.

El análisis minucioso revela patrones y tendencias en los factores de emisión de diferentes componentes en dos escenarios principales. El primero muestra niveles más bajos de emisión cuando la aceleración es neutra ( $a=0$ ), lo que sugiere una estabilidad en la combustión con una menor liberación de emisiones.

En contraste, el segundo escenario exhibe niveles más altos de emisión cuando la aceleración es menor o mayor que cero, señalando una mayor actividad en el proceso de combustión y, por ende, una emisión más notable de contaminantes.

La comparación entre los combustibles destaca el rendimiento favorable de WPO80WCO20 en la emisión de las partículas de material particulado (PM), mostrando niveles inferiores en comparación con otros combustibles. Sin embargo, en condiciones donde la aceleración es menor o igual a cero, el WPO80B20 exhibe los niveles más elevados de emisión de PM. Esta tendencia se atribuye a la interacción compleja entre la alta viscosidad y el bajo índice de cetano del biodiésel agregado en la mezcla WPO80WCO20. Estas características ejercen un efecto adverso en la

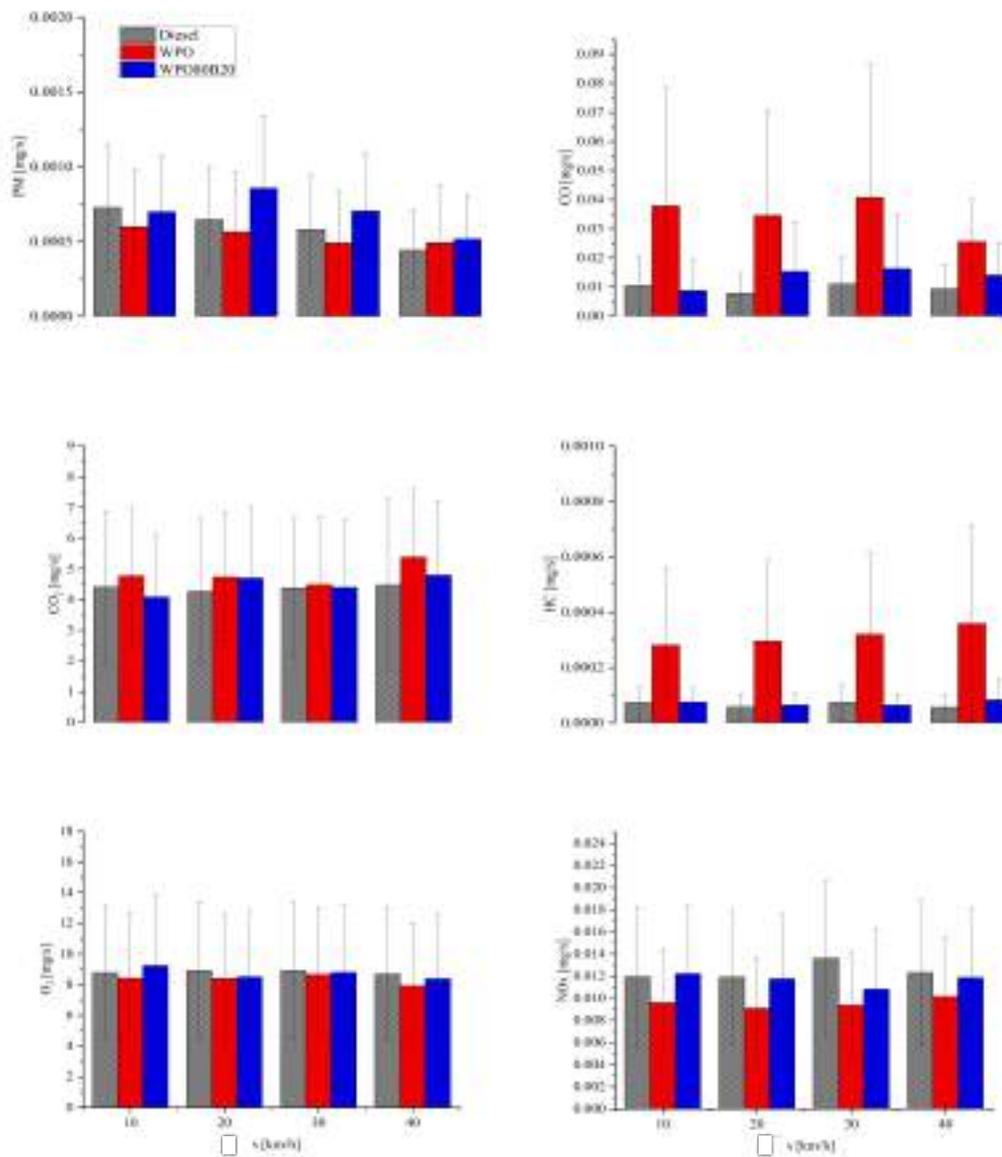


FIGURA 4.2: Tasas de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, a bajas velocidades

---

atomización del combustible y en el retraso de la ignición durante la combustión, reduciendo así el tiempo disponible para la mezcla ideal del aire combustible en el interior del motor.

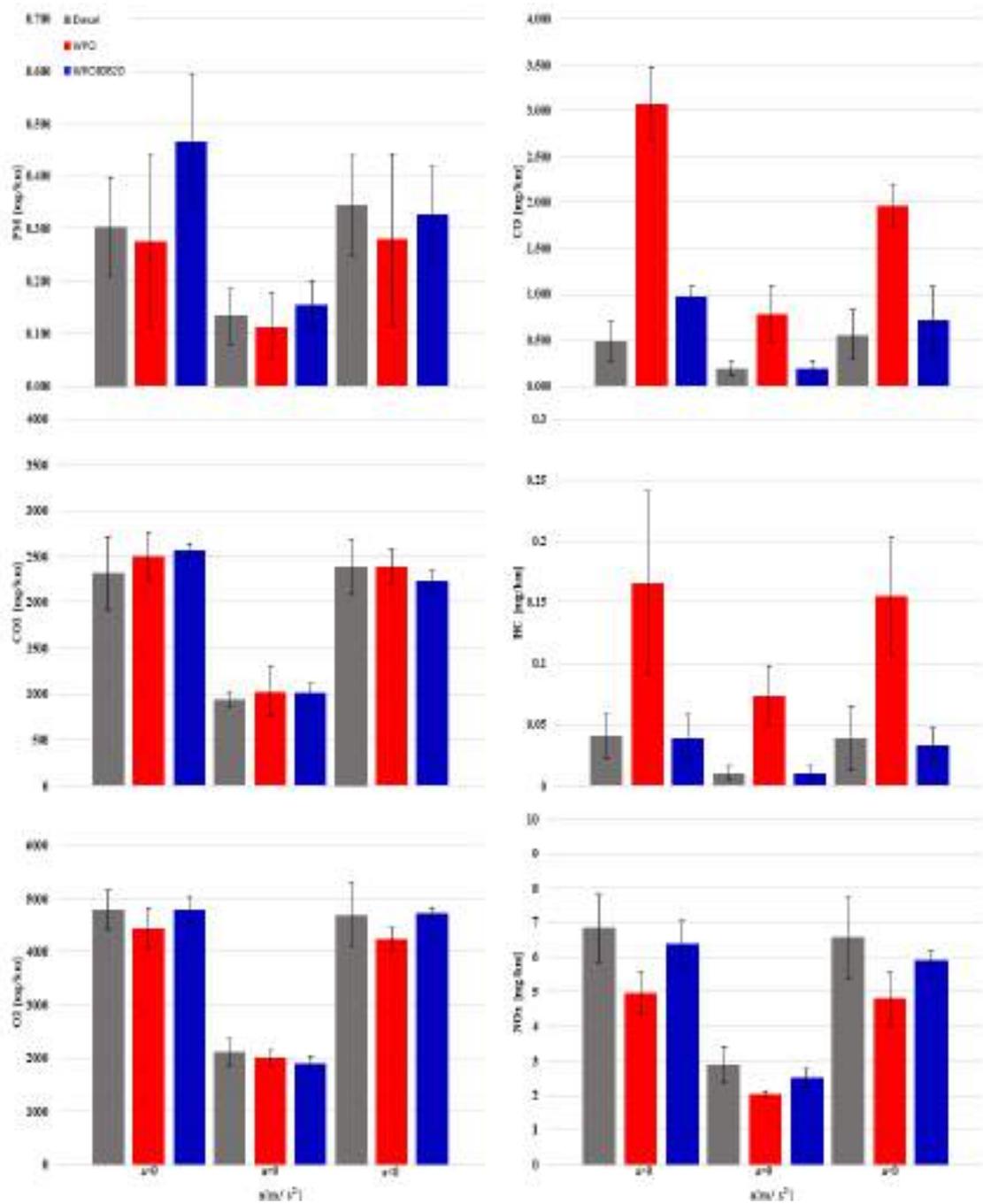


FIGURA 4.3: Factor de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, en diferentes condiciones de aceleración.

En contraste, el segundo escenario exhibe niveles más altos de emisión cuando la aceleración es menor o mayor que cero, señalando una mayor actividad en el proceso de combustión y, por ende, una emisión más notable de contaminantes.

La comparación entre los combustibles destaca el rendimiento favorable de WPO80WCO20 en la emisión de las partículas de material particulado (PM), mostrando niveles inferiores en comparación con otros combustibles. Sin embargo, en condiciones donde la aceleración es menor o igual a cero, el WPO80B20 exhibe los niveles más elevados de emisión de PM. Esta tendencia se atribuye a la interacción compleja entre la alta viscosidad y el bajo índice de cetano del biodiésel agregado en la mezcla WPO80WCO20. Estas características ejercen un efecto adverso en la atomización del combustible y en el retraso de la ignición durante la combustión, reduciendo así el tiempo disponible para la mezcla ideal del aire combustible en el interior del motor.

Los resultados experimentales resaltan un aumento notable en los factores de emisión de monóxido de carbono (CO) al emplear WPO100 en comparación con D100 y WPO80WCO20, especialmente en condiciones de aceleración donde aceleración es menor que cero. Esta tendencia puede asociarse al mayor contenido de carbono presente en el WPO en comparación con D100 y WPO80WCO20, lo que probablemente afecta la relación de equivalencia y la temperatura, generando un impacto negativo en el proceso de combustión y las emisiones resultantes.

Cuando la aceleración es mayor que cero, se observan niveles superiores de emisión de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para el WPO100 en comparación con el D100. Además, el WPO80WCO20 muestra los niveles más altos de  $CO_2$  entre todos los combustibles, indicando una combustión más completa durante la aceleración del motor debido a la oxidación completa de los átomos de carbono presentes en el combustible. Este fenómeno subraya la importancia de las propiedades químicas y físicas de los combustibles en el proceso de oxidación durante la combustión interna.

Contrariamente, cuando la aceleración es mayor que cero, los niveles más bajos de emisión de  $CO_2$  se encuentran en el WPO80WCO20, con valores superiores en el D100 en comparación con el WPO100. Además, en condiciones de aceleración neutra, los niveles de  $CO_2$  son similares entre todos los combustibles, siendo ligeramente inferiores en el D100 y el WPO80WCO20.

La inspección detallada de la Figura 4.3 y 4.4 que representa la emanación de factores de diversos combustibles (D100, WPO100 y WPO80WCO20) bajo diferentes escenarios de aceleración, descubre un panorama complejo y esclarecedor sobre cómo las propiedades inherentes de los combustibles influyen en las emisiones durante el funcionamiento de un motor.

El análisis minucioso revela patrones y tendencias en los factores de emisión de diferentes componentes en dos escenarios principales. El primero muestra niveles más bajos de emisión cuando la aceleración es neutra ( $a = 0$ ), lo que sugiere una estabilidad en la combustión con una menor liberación de emisiones.

En contraste, el segundo escenario exhibe niveles más altos de emisión cuando la aceleración es menor o mayor que cero, señalando una mayor actividad en el proceso de combustión y, por ende, una emisión más notable de contaminantes.

La comparación entre los combustibles destaca el rendimiento favorable del WPO100 en la emisión de partículas de material particulado (PM), mostrando niveles inferiores en comparación con otros combustibles. Sin embargo, en condiciones donde la aceleración es igual o menor que cero, el WPO80WCO20 exhibe los niveles más elevados de emisión de PM. Esta tendencia se atribuye a la interacción compleja entre la alta viscosidad y el bajo índice de cetano del biodiesel integrado en la mezcla WPO80WCO20. Estas características ejercen un efecto adverso en la atomización del combustible y en el retraso de la ignición durante la combustión, reduciendo así el tiempo disponible para la mezcla ideal de aire y combustible en el interior del motor.

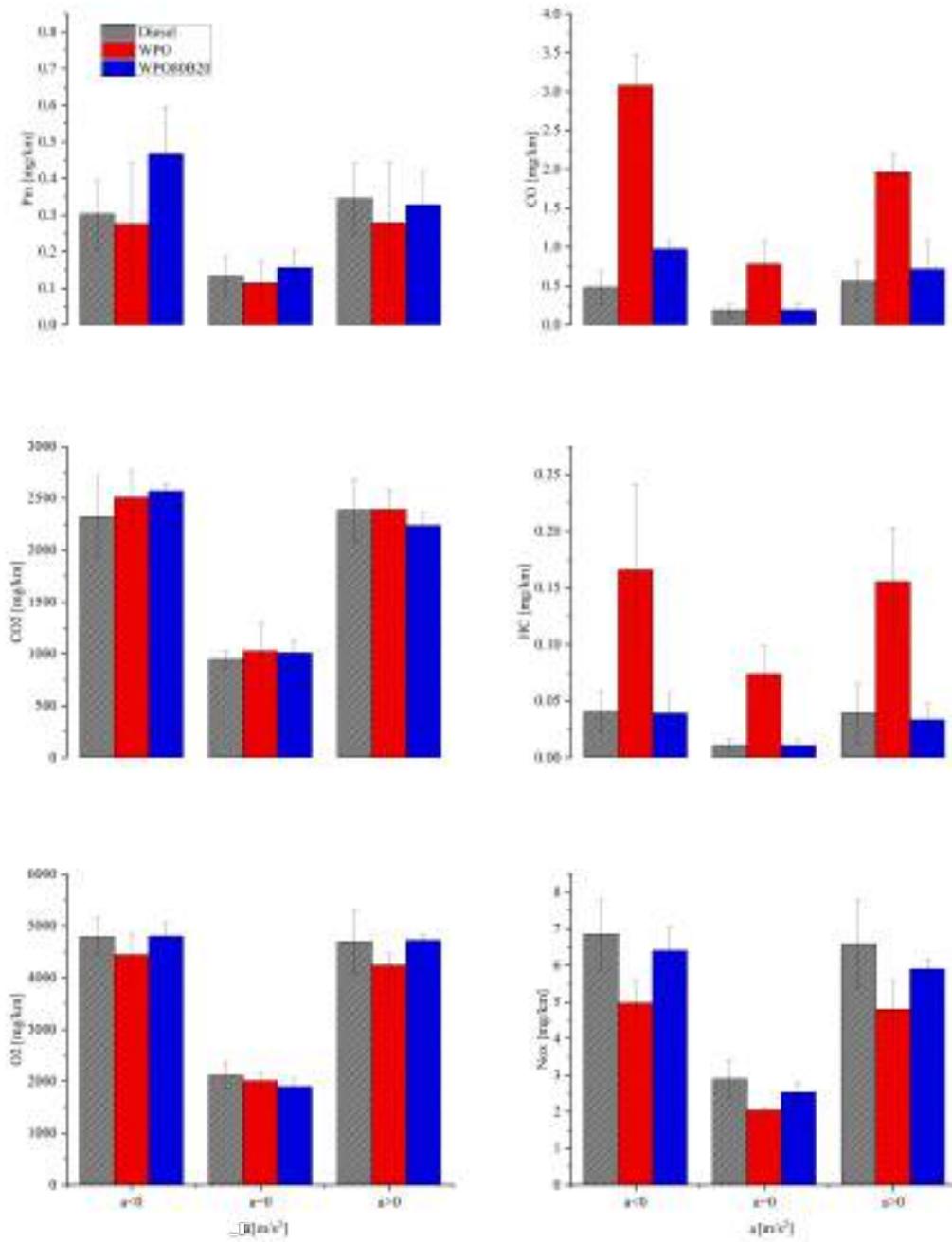


FIGURA 4.4: Tasas de emisión para D100, WPO100 y WPO80B20, en diferentes condiciones de aceleración

Los resultados experimentales resaltan un aumento notable en los factores de emisión de monóxido de carbono (CO) al emplear WPO100 en comparación con D100 y WPO80WCO20, especialmente en condiciones de aceleración donde  $a$  es menor que cero. Esta tendencia puede asociarse al mayor contenido de carbono presente en el WPO100 en comparación con D100 y WPO80WCO20, lo que probablemente afecta la relación de equivalencia y la temperatura, generando un impacto negativo en el proceso de combustión y las emisiones resultantes.

Cuando la aceleración es mayor que cero, se observan niveles superiores de emisión de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para el WPO en comparación con el D100. Además, el WPO80WCO20 muestra los niveles más altos de  $CO_2$  entre todos los combustibles, indicando una combustión más completa durante la aceleración del motor debido a la oxidación completa de los átomos de carbono presentes en el combustible. Este fenómeno subraya la importancia de las propiedades químicas y físicas de los combustibles en el proceso de oxidación durante la combustión interna.

Contrariamente, cuando la aceleración es mayor que cero, los niveles más bajos de emisión de  $CO_2$  se encuentran en el WPO80WCO20, con valores superiores en el D100 en comparación con el WPO100. Además, en condiciones de aceleración neutra (a igual a cero), los niveles de  $CO_2$  son similares entre todos los combustibles, siendo ligeramente inferiores en el D100 y el WPO80WCO20.

En relación a los hidrocarburos (HC), se observa que los niveles de emisión de WPO100 son considerablemente más altos que los de otros combustibles en los tres escenarios de aceleración. Sin embargo, los valores de emisión de HC de D100 y WPO80WCO20 muestran una similitud relativa. Estudios anteriores sostienen la idea de que la presencia de una cantidad significativa de carbono en WPO100 contribuye a este aumento en los niveles de HC. Además, fenómenos complejos como la presencia de carbono insaturado en WPO100 y la formación de zonas de quema no uniformes junto con la extinción de la llama en las paredes del cilindro, contribuyen a las emisiones de HC, según han señalado investigaciones previas en este campo.

La variación en los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) revela una disminución en WPO100 y WPO80WCO20 en todas las condiciones de aceleración en comparación con D100. Al contrastar WPO100 con WPO80WCO20, se observa un rendimiento inferior en la reducción de los niveles de emisión de  $NO_x$  para este último. Se sugiere que la alta disponibilidad de oxígeno proporcionada por el WCO en la mezcla, junto con el alto índice de cetano del WPO, eleva la temperatura dentro del cilindro, lo que resulta en una mayor producción de  $NO_x$  a través de mecanismos térmicos específicos para WPO80WCO20.

Estos resultados fundamentales subrayan la compleja interacción entre las propiedades químicas y físicas de los combustibles y su impacto en el rendimiento del motor en una variedad de condiciones de aceleración. El estudio detallado de los factores de emisión ofrece una comprensión más profunda de las complejidades inherentes a la combustión en motores de combustión interna, ofreciendo perspectivas valiosas para el desarrollo de estrategias de optimización de combustibles más eficientes y menos perjudiciales para el medio ambiente.

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

## 5.1 CONCLUSIONES

El presente estudio experimental consiste en una evaluación minuciosa de las condiciones de conducción en carreteras a bajas velocidades, explorando meticulosamente el rendimiento de una fracción media de hidrocarburos similar al diésel. Esta fracción, obtenida mediante un reactor semi discontinuo de 25 kg y combinada con WPO80WCO20, fue sometida a pruebas exhaustivas en un vehículo diésel ligero, comúnmente utilizado para el transporte de pasajeros o servicios de mensajería. Los resultados, fruto de un análisis detallado, revelaron aspectos cruciales sobre la viabilidad y las implicaciones de estos combustibles en contextos específicos de conducción.

- Se constató que el WPO100, gracias a su conjunto de características superiores que incluyen un mayor índice de cetano, un valor de poder calorífico superior (HHV) y una tensión superficial más alta, demostró beneficios significativos. Estos beneficios se reflejaron en una reducción sustancial en la generación de partículas (PM) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). Sin embargo, su utilización conllevó un incremento en la producción de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos (HC), lo que plantea desafíos y consideraciones importantes en

términos de emisiones y efectos ambientales.

- En el caso específico del WPO80WCO20, se observó un aumento notable en la generación de partículas durante las condiciones de aceleración. Sin embargo, se observó una reducción apreciable en la producción de hidrocarburos en todas las situaciones de aceleración. Además, se registró una disminución en los niveles de óxidos de nitrógeno, aunque esta reducción fue más moderada en comparación con los resultados obtenidos al emplear exclusivamente WPO100
- El estudio resaltó la influencia crítica de la velocidad en el proceso de combustión. Se evidenció que un incremento en la velocidad condujo a un proceso de combustión más eficiente y controlado. No obstante, se identificaron efectos negativos cuando la velocidad era inferior o superior a cero, lo que sugiere una correlación directa entre la dinámica de conducción y la eficiencia del combustible.
- En conclusión, tanto el WPO100 como el WPO80WCO20 emergen como alternativas prometedoras en el espectro de combustibles para aplicaciones específicas de motores en condiciones operativas determinadas. Esta conclusión resalta la importancia de considerar la versatilidad y el rendimiento de estos combustibles en una gama más amplia de contextos de uso vehicular y bajo diferentes condiciones ambientales y de conducción.
- El análisis detallado reveló que, aunque el consumo de combustible presentó una pequeña reducción al emplear WPO100 y WPO80WCO20 en lugar del combustible estándar D100, es fundamental ponderar estos beneficios en términos de eficiencia y emisiones frente a los posibles impactos en el rendimiento del motor y el medio ambiente en distintos escenarios de conducción y operación vehicular.

Este estudio destaca la necesidad continua de investigaciones exhaustivas y comparativas en el ámbito de los combustibles alternativos, no sólo para comprender

mejor su viabilidad en condiciones específicas, sino también para impulsar innovaciones que contribuyan a la reducción global de emisiones y al desarrollo de tecnologías más sostenibles en el sector del transporte.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

Resaltando la importancia de la presente investigación con los resultados obtenidos, se pueden plantear nuevas investigaciones en el mismo giro. Esperando lograr una evolución favorable para el uso de combustibles en temas medioambientales.

- Uno de los principales trabajos a futuro es que con la metodología desarrollada se puedan llegar a probar distintos tipos de combustibles alternativos, y así poder realizar una comparación directa entre ellos en términos de emisiones.
- La presente investigación se basa en condiciones de bajas velocidades simulando las condiciones reales de tráfico en una ciudad, sin embargo, cabe destacar la importancia de que las pruebas puedan llevarse a cabo en condiciones de carretera para así poder observar el comportamiento de los combustibles a altas velocidades y así poder tener resultados en términos de emisiones.
- Como continuación de este trabajo se puede buscar la normalización de la metodología en la prueba de estos combustibles y así poder incluirlos en el mercado como un aditivo o un sustituto del diésel convencional.

APÉNDICE A

PROCESADO DE DATOS

---

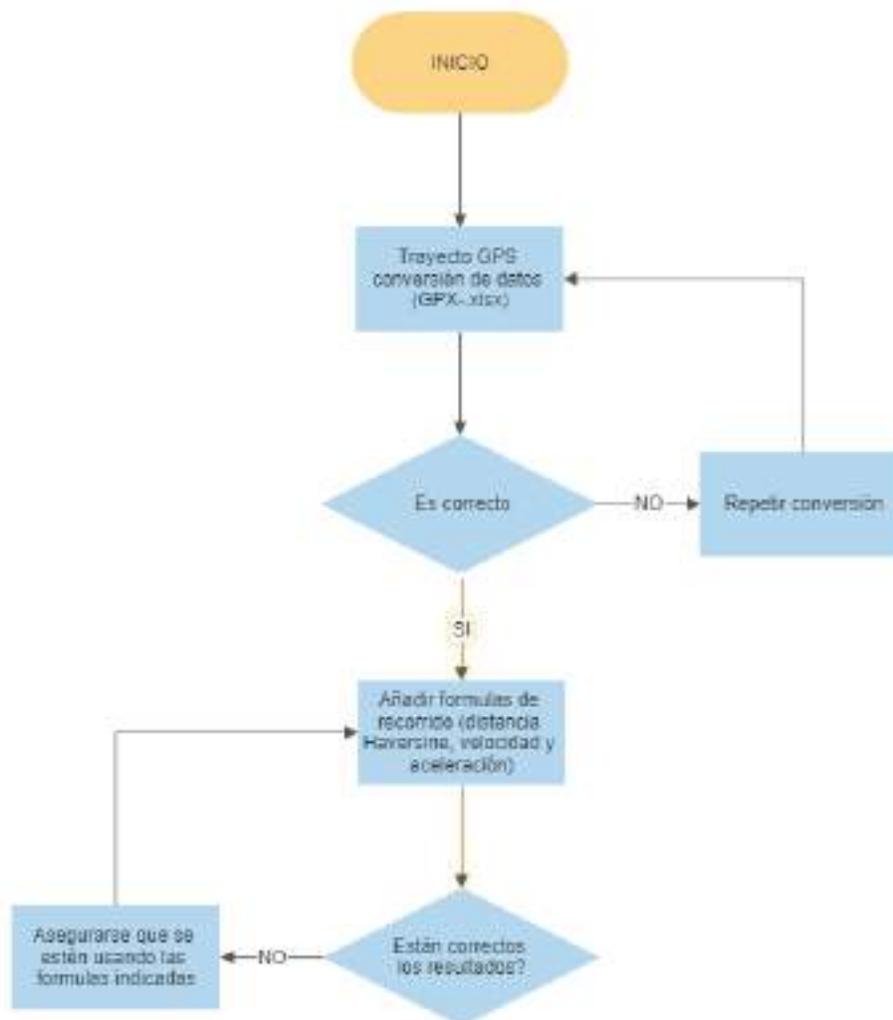


FIGURA A.1: Diagrama de flujo "Discretización de datos" (parte 1).

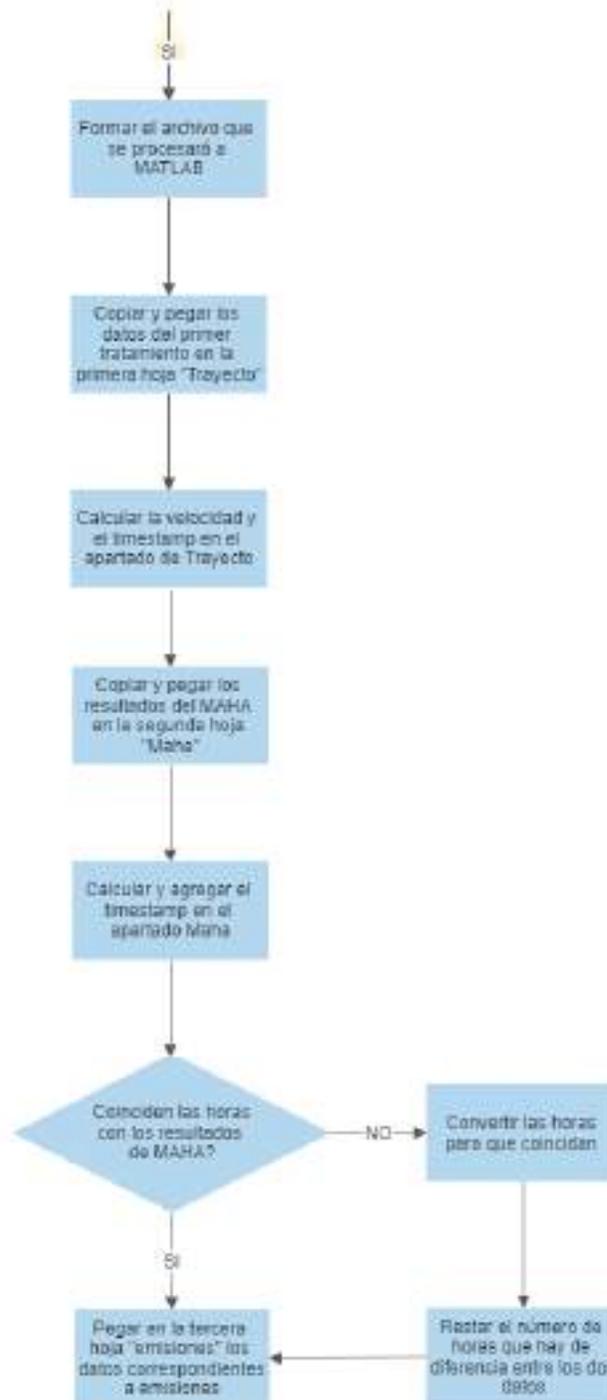


FIGURA A.2: Diagrama de flujo "Discretización de datos" (parte 2).



FIGURA A.3: Diagrama de flujo "Discretización de datos" (parte 3).

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Arnulf Grubler, Charlie Wilson, Nuno Bento, Benigna Boza-Kiss, Volker Krey, David L. McCollum, Narasimha D. Rao, Keywan Riahi, Joeri Rogelj, Simon De Stercke, Jonathan Cullen, Stefan Frank, Oliver Fricko, Fei Guo, Matt Gidden, Petr Havlík, Daniel Huppmann, Gregor Kieseewetter, Peter Rafaj, Wolfgang Schoepp, and Hugo Valin. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °c target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6):515–527, jun 2018.
- [2] ONU-Habitat - Contaminación, automóviles y calidad del aire.
- [3] José I. Huertas, Antonio E. Mogro, Alberto Mendoza, María E. Huertas, and Rolando Ibarra. Assessment of the reduction in vehicles emissions by implementing inspection and maintenance programs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13):4730, jul 2020.
- [4] M.R. Nouni, Prakash Jha, Rudranath Sarkhel, Chandan Banerjee, Arun K. Tripathi, and Joydev Manna. Alternative fuels for decarbonisation of road transport sector in india: Options, present status, opportunities, and challenges. *Fuel*, 305:121583, dec 2021.
- [5] Avinash Kumar Agarwal and Nirendra Nath Mustafi. Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137:110624, mar 2021.
- [6] A.E. Mogro and J.I. Huertas. Root causes of the differences in the real-world

- vehicle emissions between Mexico and the US. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102:103153, Jan 2022.
- [7] M. Mani, G. Nagarajan, and S. Sampath. Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy*, 36(1):212–219, Jan 2011.
- [8] Ioannis Kalargaris, Guohong Tian, and Sai Gu. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 157:108–115, Mar 2017.
- [9] Manigandan Sekar, T.R. Praveenkumar, Veeman Dhinakaran, P. Gunasekar, and Arivalagan Pugazhendhi. Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor. *Journal of Cleaner Production*, 318:128551, Oct 2021.
- [10] John B Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [11] Thokchom Subhaschandra Singh, Upendra Rajak, Abhishek Dasore, M. Muthukumar, and Tikendra Nath Verma. Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters. *Environmental Technology & Innovation*, 22:101491, May 2021.
- [12] Wisam K. Hussam, Md. Nurun Nabi, Md. Wahid Chowdhury, Md. Emdadul Hoque, Adib Bin Rashid, and Mohammad Towhidul Islam. Fuel property improvement and exhaust emission reduction, including noise emissions, using an oxygenated additive to waste plastic oil in a diesel engine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(6):1650–1674, Jul 2021.
- [13] Khatha Wathakit, Ekarong Sukjit, Chalita Kaewbuddee, Somkiat Maithomklang, Niti Klinkaew, Pansa Liplap, Weerachai Arjharn, and Jiraphon Srisert-

- pol. Characterization and impact of waste plastic oil in a variable compression ratio diesel engine. *Energies*, 14(8):2230, apr 2021.
- [14] Achyut K. Panda, S. Murugan, and R. K. Singh. Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(4):568–576, feb 2016.
- [15] Mohammad Ali Rajaeifar, Meisam Tabatabaei, Mortaza Aghbashlo, Abdul-Sattar Nizami, and Oliver Heidrich. Emissions from urban bus fleets running on biodiesel blends under real-world operating conditions: Implications for designing future case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111:276–292, 2019.
- [16] Yunhua Zhang, Diming Lou, Piqiang Tan, and Zhiyuan Hu. Particulate emissions from urban bus fueled with biodiesel blend and their reducing characteristics using particulate after-treatment system. *Energy*, 155:77–86, 2018.
- [17] Simón Martínez-Martínez, Daniel de la Rosa-Urbalejo, Luis F Rúa-Mojica, Raúl Hernández-Altamirano, and Violeta Y Mena-Cervantes. Experimental analysis of real-world emissions using ultra-low carbon intensity biodiesel for a light-duty diesel vehicle in monterrey metropolitan area. *Fuel*, 317:123408, 2022.
- [18] DK Ramesha et al. Performance, combustion and emission characteristics of b20 fish biodiesel blended with waste plastic oil on a diesel engine. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1473, page 012036. IOP Publishing, 2020.
- [19] GT Kalghatgi, Avinash Kumar Agarwal, Felix Leach, and Kelly Senecal. *Engines and Fuels for Future Transport*. Springer, 2022.
- [20] Violeta Y Mena-Cervantes, Simón Martínez-Martínez, Oscar A de la Garza, Raúl Hernández-Altamirano, Miguel García-Yera, and Miguel F Altamirano-Muratalla. Biodiesel derived from waste cooking oil in blends with ultra-low

- sulphur diesel and its spray macroscopic properties under split injection strategy. *Biofuels*, pages 1–11, 2022.
- [21] Hideki Fukuda, Akihiko Kondo, and Hideo Noda. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of bioscience and bioengineering*, 92(5):405–416, 2001.
- [22] José Manuel Riesco-Avila, James R Vera-Rozo, David A Rodríguez-Valderrama, Diana M Pardo-Cely, and Bladimir Ramón-Valencia. Effects of heating rate and temperature on the yield of thermal pyrolysis of a random waste plastic mixture. *Sustainability*, 14(15):9026, 2022.
- [23] Sadegh Papari, Kelly Hawboldt, and Robert Helleur. Pyrolysis: A theoretical and experimental study on the conversion of softwood sawmill residues to biooil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(2):605–611, 2015.
- [24] Pawel J Donaj, W Kaminsky, F Buzeto, and Weihong Yang. Pyrolysis of polyolefins for increasing the yield of monomers’ recovery. *Waste management*, 32(5):840–846, 2012.
- [25] Meng Lyu, Xiaofeng Bao, Rencheng Zhu, and Ronald Matthews. State-of-the-art outlook for light-duty vehicle emission control standards and technologies in china. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(4):757–771, 2020.
- [26] Weinan He, Lei Duan, Zhuoyuan Zhang, Xu Zhao, and Ying Cheng. Analysis of the characteristics of real-world emission factors and vsp distributions—a case study in beijing. *Sustainability*, 14(18):11512, 2022.
- [27] Junfeng (Jim) Zhang and Lidia Morawska. Combustion sources of particles: 2. emission factors and measurement methods. *Chemosphere*, 49(9):1059–1074, dec 2002.
- [28] Muhamad Sharul Nizam Awang, Nurin Wahidah Mohd Zulkiffi, Muhammad Mujtaba Abbas, Syahir Amzar Zulkiffi, Md Abul Kalam, Muhammad Hazwan Ahmad, Mohd Nur Ashraf Mohd Yusoff, Mazrina Mazlan, and Wan Mohd

- Ashri Wan Daud. Effect of addition of palm oil biodiesel in waste plastic oil on diesel engine performance, emission, and lubricity. *ACS Omega*, 6(33):21655–21675, aug 2021.
- [29] Medhat Elkelawy, Hagar Alm-Eldin Bastawissi, E.A. El Shenawy, Mohammed Taha, Hitesh Panchal, and Kishor Kumar Sadasivuni. Study of performance, combustion, and emissions parameters of DI-diesel engine fueled with algae biodiesel/diesel/n-pentane blends. *Energy Conversion and Management: X*, 10:100058, jun 2021.
- [30] V.L. Mangesh, S. Padmanabhan, P. Tamizhdurai, and A. Ramesh. Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*, 246:119066, feb 2020.
- [31] Chalita Kaewbuddee, Ekarong Sukjit, Jiraphon Srisertpol, Somkiat Maithomklang, Khatha Wathakit, Niti Klinkaew, Pansa Liplap, and Weerachai Arjharn. Evaluation of waste plastic oil-biodiesel blends as alternative fuels for diesel engines. *Energies*, 13(11):2823, jun 2020.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

BRANDON REYES RAMÍREZ

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias de la Ingeniería  
con Orientación en Energías Térmicas y Renovables

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

ANÁLISIS DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR  
DIESEL EN UN CIRCUITO URBANO UTILIZANDO UN COMBUSTIBLE  
ALTERNATIVO