



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE ESCAPE DE
UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZANDO
MEZCLAS DE DIÉSEL, BIODIÉSEL SUPERCRÍTICO Y ÓXIDO DE
CERIO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TRUJILLO MALES ENRIQUE LEONARDO

enrique.trujillo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PORTILLA AGUILAR ÁNGEL MSc.

angel.portilla@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. GUZMÁN BECKMANN LILIANA MSc.

liliana.guzman@epn.edu.ec

Quito, marzo 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por ENRIQUE LEONARDO TRUJILLO MALES, bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Portilla, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por ENRIQUE LEONARDO TRUJILLO MALES, bajo mi supervisión.

Ing. Liliana Guzmán, MSc.
CODIRECTORA DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Enrique Leonardo Trujillo Males, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Enrique Leonardo Trujillo Males

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres César y Rosa quienes me han guiado durante toda mi vida y a mis hermanos Miriam, Javier, César y Karen por brindarme siempre su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros, también a todas las personas que de una u otra forma me guiaron en el desarrollo de mi proyecto, a todos muchas gracias.

Enrique Leonardo Trujillo Males

AGRADECIMIENTO

Al Proyecto PIMI 15-10 conformado por la Ing. Liliana Guzmán, Ing. Ángel Portilla, Ing. Diego Lincango y Johana Yaselga, al Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) y al Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV) por brindarme su apoyo y conocimientos que me incentivaron para alcanzar el objetivo trazado en la búsqueda de ser un excelente profesional.

Enrique Leonardo Trujillo Males

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Principio de funcionamiento del motor diésel	3
1.1.1. Particularidades de funcionamiento	3
1.2. Combustible.....	5
1.2.1. Diésel.....	5
1.2.2. Propiedades físicas y químicas del diésel	6
1.2.3. Biocombustibles.....	10
1.2.4. Propiedades físicas y químicas del biodiésel	11
1.2.5. Incidencia del biocombustible en motores diésel.....	12
1.2.6. Aditivos	15
1.2.7. Propiedades físicas y químicas del aditivo	16
1.2.8. Incidencia del óxido de cerio como aditivo en motores diésel	17
1.3. Emisiones contaminantes de un motor diésel	20
1.3.1. Hidrocarburos (HC).....	20
1.3.2. Óxidos de azufre (SO _x)	20
1.3.3. Óxidos de nitrógeno (NO _x)	21
1.3.4. Material particulado (PM)	21
1.3.5. Monóxido de carbono (CO).....	22
1.4. Ciclos de conducción	24
1.4.1. Ciclo de Conducción IM-240	24
1.5. Factores de emisión.....	25
1.5.1. Métodos de obtención de los factores de emisión	25
1.5.2. Cálculo de los factores de emisión	25
1.6. Regulación y control de emisión de gases contaminantes	29
1.6.1. Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire.....	29
1.6.2. Normas de Emisiones	30
1.6.3. Control de Emisiones	35
2. METODOLOGÍA	37
2.1. Elaboración de biodiésel.....	37
2.1.1. Equipos.....	38

2.2. Caracterización de las mezclas.....	40
2.3. Medición de emisiones contaminantes en concentración.....	42
2.3.1. Equipos.....	42
2.3.2. Protocolo IM-240.....	50
2.4. Cálculo de factores de emisión	57
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
3.1. Resultados.....	58
3.1.1. Caracterización de las mezclas.....	58
3.1.2. Comportamiento de los gases de escape	62
3.1.3. Medición de las concentraciones de emisiones de gases de escape	67
3.1.4. Medición de los factores de emisión	74
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	78
4.1. Conclusiones	78
4.2. Recomendaciones	78
4.3. Trabajos futuros.....	79
Referencias Bibliográficas	80
Anexos.....	84

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Fases del proceso de combustión para un MEC, diagramas de masa quemada (m) y calor liberado (Q).	3
Figura 1. 2. Columna de destilación del petróleo.	6
Figura 1. 3. Clasificación de los biocombustibles a gasolina y diésel.	10
Figura 1. 4. Esquemas de formación y emisión de partículas.	21
Figura 1. 5. Distribución del tamaño de partículas.	22
Figura 1. 6. Ciclo de conducción IM-240.	25

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1. Proceso de elaboración de biodiésel por transesterificación supercrítica.	37
Figura 2. 2. Mezclas caracterizadas.....	41
Figura 2. 3. Cajas de Interfaces, módulos.....	46
Figura 2. 4. Ventilador.....	47
Figura 2. 5. Tanque externo, medidor de consumo de combustible.	47
Figura 2. 6. Sistema de extracción de gases.	48
Figura 2. 7. Esquema de pruebas.	50
Figura 2. 8. Probeta de medición con cada mezcla de combustible.	51
Figura 2. 9. Posicionamiento y fijación del vehículo de prueba sobre el dinamómetro, vista frontal y posterior.....	52
Figura 2. 10. Instalación de los analizadores de gases, vista lateral y posterior.....	52
Figura 2. 11. Posicionamiento del extractor de gases.	53
Figura 2. 12. Posicionamiento del ventilador.....	53
Figura 2. 13. Instalación del depósito externo de combustible.	54
Figura 2. 14. Interfaz del dinamómetro de chasis.	54
Figura 2. 15. Interfaz del ciclo de conducción IM-240.	55
Figura 2. 16. Interfaz de la adquisición de datos del equipo On Board Axion Go.	55
Figura 2. 17. Interfaz de la adquisición de datos del equipo MET 6.3.	56
Figura 2. 18. Interfaz de la adquisición de datos del equipo MPM 4M.....	56
Figura 2. 19. Proceso para la obtención de los factores de emisión de cada mezcla. .	57

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1. Variación del Punto de Inflamación.....	59
Figura 3. 2. Contenido de azufre de las mezclas ensayadas.	59
Figura 3. 3. Variación del Poder Calórico.....	60

Figura 3. 4. Densidad de cada una de las mezclas ensayadas.....	61
Figura 3. 5. Variación de la Viscosidad Cinemática.	62
Figura 3. 6. Velocidad vs. tiempo del ciclo de conducción IM-240.....	63
Figura 3. 7. Comportamiento de las emisiones de CO, CO ₂ y O ₂ del diésel de origen fósil (D).	63
Figura 3. 8. Comportamiento de las emisiones de HC y NO _x del diésel de origen fósil (D).	64
Figura 3. 9. Comportamiento de las emisiones de CO, CO ₂ y O ₂ de la mezcla (B10).	64
Figura 3. 10. Comportamiento de las emisiones de HC y NO _x de la mezcla (B10).	64
Figura 3. 11. Comportamiento de las emisiones de CO, CO ₂ y O ₂ de la mezcla (DC).	65
Figura 3. 12. Comportamiento de las emisiones de HC y NO _x de la mezcla (DC).....	65
Figura 3. 13. Comportamiento de las emisiones de CO, CO ₂ y O ₂ de la mezcla (B10DC).	66
Figura 3. 14. Comportamiento de las emisiones de HC y NO _x de la mezcla (B10DC).	66
Figura 3. 15. Comportamiento de las temperaturas de gases de escape del motor.	67
Figura 3. 16. Comportamiento del dióxido de carbono.	68
Figura 3. 17. Comportamiento del monóxido de carbono.	69
Figura 3. 18. Comportamiento del oxígeno.	69
Figura 3. 19. Comportamiento de los hidrocarburos.....	70
Figura 3. 20. Comportamiento de los óxidos de nitrógeno.	71
Figura 3. 21. Temperaturas promedio de los gases de escape durante el ciclo IM-240.	72
Figura 3. 22. Comportamiento del Material Particulado PM ₁₀	72
Figura 3. 23. Consumo de combustible.....	73
Figura 3. 24. Cambio porcentual de los diferentes gases de escape y del consumo de combustible en función de los tipos de combustibles empleados.....	74
Figura 3. 25. Comportamiento del factor de emisión CO.....	75
Figura 3. 26. Comportamiento del factor de emisión HC.....	76
Figura 3. 27. Comportamiento del factor de emisión NO _x	76
Figura 3. 28. Variación porcentual de los factores de emisión FCO, FHC y FNO _x	77

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. 1. Propiedades del combustible diésel que afectan al desempeño mecánico y ambiental.....	9
Tabla 1. 2. Requisitos del Diésel Premium.....	9
Tabla 1. 3. Propiedades del Biodiésel.....	12
Tabla 1. 4. Incidencia de biodiésel de aceite de palma en las emisiones de gases de escape en la última década.	13
Tabla 1. 5. Propiedades del Óxido de Cerio.....	17
Tabla 1. 6. Incidencia del Óxido de Cerio en las emisiones contaminantes.	17
Tabla 1. 7. Contaminantes del motor diésel.	23
Tabla 1. 8. Fórmula molecular equivalente.	26
Tabla 1. 9. Concentraciones de contaminantes comunes.	30
Tabla 1. 10. Métodos de medición de concentración.	30
Tabla 1. 11. Normas de regulación de emisiones en Estados Unidos para vehículos de pasajeros. Basado en el ciclo FTP 75.....	32
Tabla 1. 12. Normas de regulación de emisiones en la Unión Europea para vehículos de pasajeros (<2500 kg). Basado en el Nuevo Ciclo de Manejo (NEDC= ECE15+EUDC).	33
Tabla 1. 13. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diésel, bajo prueba dinámica en ciclos americanos, a partir del año modelo 2000.....	34
Tabla 1. 14. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diésel, bajo prueba dinámica en ciclos europeos, a partir del año modelo 2000.	34

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1. Reactor.	38
Tabla 2. 2. Destilador al vacío.....	39
Tabla 2. 3. Agitador magnético.	40
Tabla 2. 4. Propiedades del combustible con su respectiva norma.	41
Tabla 2. 5. Especificaciones técnicas del dinamómetro de chasis.	43
Tabla 2. 6. Especificaciones técnicas del analizador de gases.	44
Tabla 2. 7. Especificaciones técnicas del analizador de gases.	45
Tabla 2. 8. Especificaciones técnicas del medidor de partículas.	46
Tabla 2. 9. Especificaciones técnicas del vehículo.....	49
Tabla 2. 10. Sistema de adquisición de datos de temperatura de gases de escape. ..	49

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1. Resultados de las propiedades físicas de cada mezcla de combustible....	58
Tabla 3. 2. Concentraciones promedio de cada mezcla de combustible.	67
Tabla 3. 3. Factores de Emisión obtenidos.	75

RESUMEN

El presente documento describe la evaluación de las emisiones de gases de escape en un motor de encendido por compresión utilizando mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio; el biodiésel utilizado fue obtenido por transesterificación supercrítica del aceite crudo de palma con agua destilada y etanol en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) y las pruebas de emisiones se llevaron a cabo en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV), los cuales son laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) ubicada al norte de la ciudad de Quito. Se utilizaron cuatro combustibles: diésel (D), diésel con 10% de biodiésel supercrítico (B10), diésel con óxido de cerio de 250ppm (DC), y diésel con 10% de biodiésel supercrítico y óxido de cerio de 250ppm (B10DC). El ciclo de conducción utilizado fue el IM-240 en un dinamómetro de chasis, se determinaron las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimientos de los combustibles con lo cual es posible determinar los factores de emisión utilizando el modelo simplificado de la combustión. Una vez realizadas las pruebas se determinó que los HC, NO_x y el PM₁₀ se reducen en todas las mezclas a comparación del diésel, se determinó una disminución de la temperatura de gases de escape lo cual se lo atribuye a la menor formación de NO_x durante la combustión, y en cuanto a factores de emisión el combustible B10DC presenta una reducción significativa de los mismos en comparación con el diésel.

Palabras clave: Biodiésel, transesterificación, evaluación, IM-240, PM₁₀.

ABSTRACT

This document describes evaluation of exhaust gas emissions in a compression ignition engine using mixtures of diesel, supercritical biodiesel and cerium oxide. Biodiesel was obtained by supercritical transesterification of the crude palm oil with distilled water and ethanol in LACBAL (Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes). Emission tests were carried out in CCICEV (Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares), in EPN (Escuela Politécnica Nacional) laboratories located north of Quito. Different fuels were used: diesel (D), diesel with 10% supercritical biodiesel (B10), diesel with cerium oxide of 250ppm (DC), and diesel with 10% supercritical biodiesel and cerium oxide of 250ppm (B10DC). The driving cycle used was the IM-240 in a chassis dynamometer. The concentrations of pollutant emissions and fuel performance were determined. It is possible to determinate the emission factors using the simplified combustion model. Once the tests were carried out, it was determined that HC, NO_x and PM₁₀ reduced in all the mixtures compared to the diesel, reduction of temperature of exhaust gases was determined, this was due to the lower formation of NO_x during the combustion. In terms of emission factors B10DC fuel presents a significant reduction compared to diesel.

Keywords: Biodiesel, transesterification, evaluation, IM-240, PM₁₀.

“EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE ESCAPE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZANDO MEZCLAS DE DIÉSEL, BIODIÉSEL SUPERCRÍTICO Y ÓXIDO DE CERIO”

INTRODUCCIÓN

Los motores de ciclo diésel que se movilizan en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) contaminan durante su vida útil con hidrocarburos quemados o parcialmente quemados (HC), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) [1]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a material particulado disminuye la esperanza de vida de cada persona en un promedio de casi 1 año, debido principalmente al aumento del riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y el cáncer de pulmón [2]. Según la Environmental Protection Agency (EPA) las emisiones de motores diésel son una fuente significativa de la contaminación atmosférica y que el material particulado, PM_{2.5}, ocasiona asma, daño pulmonar, e incluso son un factor de riesgo para muertes prematuras [3]. A su vez los óxidos de nitrógeno forman ozono troposférico el cual ocasiona problemas respiratorios y afecta a la vegetación y forman también ácido nítrico que provoca la lluvia ácida [1], [4], [5].

Para afrontar esta problemática existen varias soluciones que vienen de la mano tanto de tecnología automotriz haciendo referencia a dispositivos de pre y postcombustión, los combustibles en conjunto con biocombustibles y aditivos, y finalmente la aplicación de normativas más rigurosas. La EPN mediante el Proyecto de Investigación Multi e Inter Disciplinario PIMI 15-10 plantea estudiar la producción de biodiésel para el sector automotriz bajo condiciones supercríticas y evaluar el desempeño mecánico y ambiental en motores de combustión interna encendidos por compresión; para alcanzar este objetivo el presente trabajo evaluará las emisiones de gases de escape de un motor de encendido por compresión (MEC) utilizando mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio mediante el protocolo IM-240. [6]

Así se podrá evidenciar tanto las ventajas como las desventajas del uso del biocombustible bajo condiciones supercríticas y la reducción de emisiones contaminantes de CO, NO_x, HC y PM por el uso de mezclas de diésel, biodiésel y óxido de cerio [7], [8]; el uso de biocombustibles es una opción factible ya que el parque automotor nacional cumple con parámetros de la tecnología EURO 1 y 2 [9] y no cuentan

con dispositivos postcombustión, entonces esta alternativa generará una opción para la disminución de emisiones contaminantes y factores de emisión emitidos por motores de ciclo diésel.

Pregunta de Investigación

¿Cómo afectan las mezclas de diésel con biodiésel supercrítico y con óxido de cerio en las emisiones contaminantes de un motor encendido por compresión?

Objetivo general

Evaluar las emisiones de gases de escape de un motor de encendido por compresión utilizando mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio.

Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de emisiones contaminantes CO [%V], CO₂ [%V], O₂ [%V], HC [ppm], NO_x [ppm] y material particulado [mg/m³] del diésel de origen fósil.
- Determinar las concentraciones de emisiones contaminantes CO [%V], CO₂ [%V], O₂ [%V], HC [ppm], NO_x [ppm] y material particulado [mg/m³] del diésel de origen fósil con biodiésel supercrítico.
- Determinar las concentraciones de emisiones contaminantes CO [%V], CO₂ [%V], O₂ [%V], HC [ppm], NO_x [ppm] y material particulado [mg/m³] del diésel de origen fósil con óxido de cerio.
- Determinar las concentraciones de emisiones contaminantes CO [%V], CO₂ [%V], O₂ [%V], HC [ppm], NO_x [ppm] y material particulado [mg/m³] del diésel de origen fósil con biodiésel supercrítico y óxido de cerio.
- Determinar los factores de emisión: NO_x [g/km], CO [g/km] y HC [g/km] del combustible y de cada mezcla empleando el modelo matemático simplificado de la combustión.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Principio de funcionamiento del motor diésel

El principio de funcionamiento del motor de encendido por compresión (MEC) radica en el proceso de combustión, el cual se lo realiza por un autoencendido el mismo que es controlado en mayor parte por el sistema de inyección; la combustión está compuesta en dos fases, a saber, combustión premezclada la cual ocurre a gran rapidez, y la segunda que es una combustión por difusión controlada por la inyección la misma que es más lenta que la primera.

Con fines prácticos es razonable asumir que el proceso realizado en la primera fase es a volumen constante, combustión premezclada, y la segunda fase es a presión constante, combustión por difusión [10].

1.1.1. Particularidades de funcionamiento

El proceso de formación de la mezcla en los motores diésel inicia milisegundos después de la inyección del combustible, en la Figura 1.1. se puede observar las fases del proceso de combustión en MEC con ayuda de los diagramas de masa quemada y calor liberado.

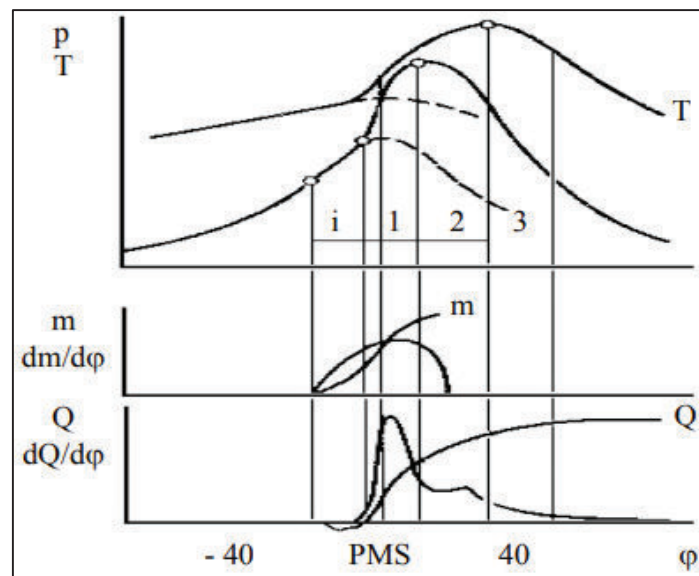


Figura 1.1. Fases del proceso de combustión para un MEC, diagramas de masa quemada (m) y calor liberado (Q).

(Fuente: [11])

Donde:

Retardo a la inflamación: abarca desde el inicio de la inyección de combustible hasta que ocurre el fenómeno de la autoinflamación. Esta fase es considerada como un

período de preparación de la mezcla aire-combustible, donde las altas temperaturas y la turbulencia permiten que el combustible líquido se vaporice para dar comienzo a la combustión propiamente dicha cuando se supera la temperatura de autoencendido. La cantidad de masa quemada en esta fase es muy pequeña para contribuir de manera notable con el incremento de presión interna del cilindro.

Combustión rápida: esta se presenta desde el punto de separación hasta el punto de máxima presión y debido a la cantidad de combustible acumulado que se quema (m) y a la participación del combustible inyectándose se logra un incremento rápido de presión. En esta fase la plenitud del proceso de combustión se debe en gran parte a las características de la difusión entre vapores de combustible y el aire fresco, el proceso de liberación de energía (Q) en esta fase crece rápidamente mostrando un pico bastante elevado. Se sabe que cuando se alcanza la presión máxima si el motor opera a plena carga con un ciclo de trabajo bien organizado se estima un 33% de liberación de energía.

Combustión lenta: continuando con la combustión se observa una reducción de presión (P) no muy relevante con poco crecimiento del diagrama de liberación de calor (Q) hasta el punto donde se alcanza la temperatura máxima (T). El desarrollo del proceso de combustión en esta fase está dominado por las condiciones de mezclado entre los vapores de combustible y el aire fresco. El continuo movimiento del aire es imprescindible para desalojar los gases quemados y permitir el mezclado de los reactantes. La cantidad de energía liberada en la temperatura máxima oscila entre un 70 al 80% del total que posee el combustible.

Combustión residual: en la Figura 1.1. se observa en el diagrama de liberación de energía que la combustión continúa aún después de haberse alcanzado la temperatura máxima desarrollándose en una parte considerable de la carrera de expansión. Lo anterior sucede debido al quemado tardío de porciones de combustible localizadas en zonas de sobre enriquecimiento local, pero el desarrollo de esta fase no es deseable no obstante por las características del proceso de combustión en MEC es inevitable, su duración alcanza entre 70 a 80° de giro del cigüeñal y debido a la falta de oxígeno y presencia de gran cantidad de gases residuales el proceso de liberación de energía empeora drásticamente.

Durante la carrera de admisión, solo aire es admitido al cilindro el cual sobre un calentamiento. En la carrera de compresión, en la cámara del motor, se crean las condiciones de temperatura y presión que aseguran la autoinflamación del combustible. Grados antes del punto muerto superior (PMS), da inicio la inyección del combustible en un ambiente de aire en condiciones de elevada temperatura y presión. Existe un período

denominado retardo a la inflamación en el cual parte del combustible vaporizado localmente forma la mezcla aire-combustible apta para que empiece la combustión. El movimiento turbulento del aire dentro de la cámara de combustión del motor expulsa parte de los gases quemados e inserta nuevas cantidades de aire para continuar con la formación de la mezcla aire-combustible [12].

A continuación se describen las propiedades físicas y químicas del combustible empleado en los motores de combustión interna, explícitamente en los motores de encendido por compresión.

1.2. Combustible

1.2.1. Diésel

El diésel o gasóleo es una mezcla de hidrocarburos compuesta por parafinas (cadenas lineales de hidrocarburos que aumentan el número de cetano del diésel) y aromáticos (anillos bencénicos que disminuyen el número de cetano), principalmente, con un bajo contenido de olefina (hidrocarburos insaturados con un doble enlace entre carbonos), al ser un producto derivado del petróleo que no es manufacturado su composición química no es exacta pero se consideran valores entre los siguientes $C_{14.3}H_{26.2}$ a $C_{12}H_{23}$ [13].

El combustible diésel se lo puede obtener en una amplia gama de pesos moleculares y propiedades físicas, en términos generales si mayor es su refinación, si tiene un menor peso molecular y una baja viscosidad su costo aumentará [14]. Dentro del campo automotriz el diésel es el combustible encargado de dar energía a vehículos de carga liviana como de carga pesada.

El proceso de obtención de diésel se resume a continuación [15]:

- Separación de gas y petróleo
- Almacenamiento de petróleo (separar impurezas por sedimentación)
- Estación del oleoducto
- Almacenaje en la refinería
- Calentamiento del petróleo crudo a $400^{\circ}C$
- Torre de destilación atmosférica (obtención de diésel entre los 220 a $250^{\circ}C$)
- Hidrotratamiento (eliminación de contaminantes como nitrógeno, azufre, oxígeno y metales pesados)
- Transporte a servicios de abastecimiento de diésel

En la Figura 1.2. se muestra la torre de destilación atmosférica con todos los productos obtenidos del petróleo crudo, el diésel es obtenido como un producto intermedio entre los 220 a 250°C.

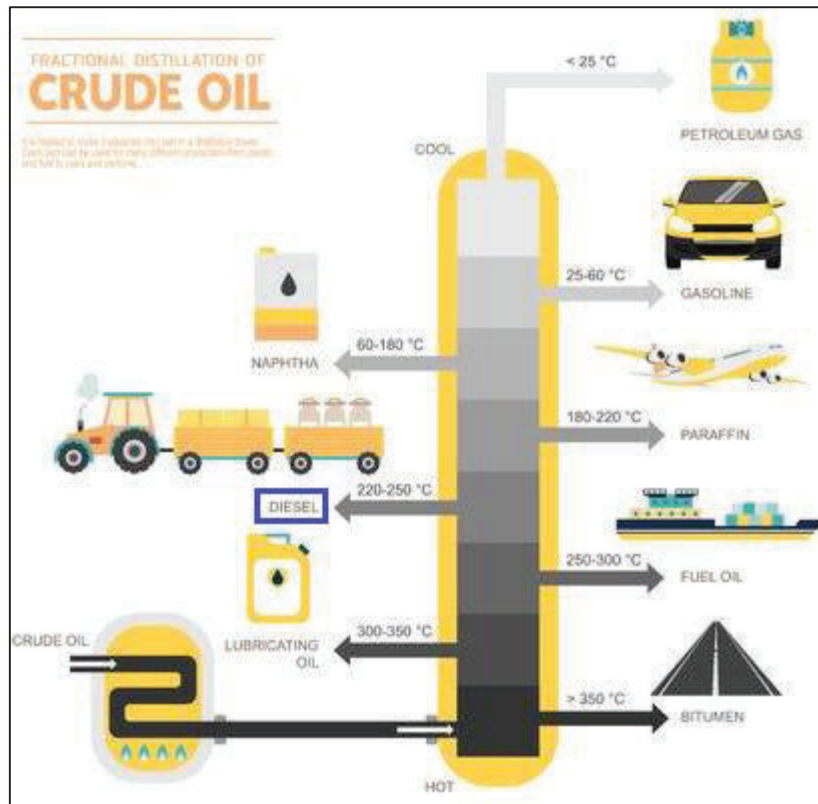


Figura 1. 2. Columna de destilación del petróleo.

(Fuente: [16])

En el siguiente apartado se analizan las propiedades tanto físicas como químicas del diésel y su influencia en las emisiones de gases de escape generadas en el proceso de compresión del mismo.

1.2.2. Propiedades físicas y químicas del diésel

Densidad: los valores de densidad del diésel de origen fósil oscilan entre 820 y 845 kg/m³ [10], una mayor densidad aumenta la concentración de energía del combustible y provoca una mayor viscosidad lo que conduce a una combustión deficiente afectando tanto el rendimiento del motor como sus emisiones. Las mezclas de diésel-biodiésel generan un aumento de la densidad proporcional al contenido de biodiésel; pero en mezclas de hasta un 20% de biodiésel la densidad es muy similar al diésel [17]. Con el uso de biodiésel se mejora la atomización de la mezcla y la combustión presenta una reducción de emisiones de CO [12], [18], [19].

Poder Calorífico: se define como la cantidad de calor desprendida durante la combustión por unidad de masa kJ/kg ó kcal/kg; se divide en Poder Calorífico Superior (PCS) es la cantidad de calor desprendido en la combustión de un kilogramo de combustible, considerando el calor desprendido por la condensación del vapor de agua y el Poder Calorífico Inferior (PCI) el cual es el calor desprendido por kilogramo de combustible, sin tomar en cuenta la energía calorífica absorbida por la vaporización del agua contenida en los productos de combustión [20]. El rendimiento de la combustión se encuentra directamente influenciado por el poder calorífico el mismo que facilita la liberación de calor durante la combustión y mejora la potencia de salida, el poder calorífico del diésel de origen fósil oscila entre 43 a 47 MJ/kg y sus mezclas con biodiésel presentan valores de 35.6 a 44.16 MJ/kg por lo que cuando se emplean mezclas de diésel con un determinado porcentaje de biodiésel se genera la disminución tanto de potencia como de torque del motor [17], [21], [22].

Viscosidad Cinemática: es la resistencia que presenta el combustible a fluir por el sistema de alimentación y de inyección. Se mide en Stokes (mm^2/s), varía inversamente proporcional con la temperatura, a menudo se mide la viscosidad a una temperatura de 40°C ya que esta es la temperatura de funcionamiento de la bomba de inyección en un motor diésel. Además se sabe que a mayor viscosidad se genera un chorro de combustible largo y no se pulveriza totalmente lo cual genera una mayor cantidad de gases de escape; por otra parte a viscosidades bajas el chorro de combustible es corto y se pulveriza de mejor manera, no obstante se genera desgaste en el sistema de inyección ya que la lubricidad no es adecuada [23].

Número de Cetano: es una magnitud que relaciona el tiempo desde la inyección hasta la combustión por lo que es una medida de calidad del autoencendido del diésel. Para obtener un funcionamiento estable de un MEC se necesita una inflamación rápida del combustible a medida que ingresa y hace contacto con el aire de la cámara de combustión; un número de cetano bajo retrasará la combustión ocasionando un aumento en la presión del cilindro [24] y por ende un aumento en la temperatura de los gases de escape. En general, el biodiésel posee un número de cetano más alto que el diésel; esto se debe a que el biodiésel se compone en gran parte de grupos de hidrocarburos de cadena larga. Por esta razón, con los aumentos en el porcentaje de biodiésel en una mezcla de diésel-biodiésel, el número de cetano de la mezcla aumenta, pero para mezclas de hasta 30% de biodiésel el número de cetano es casi similar al diésel ordinario [17].

Contenido de azufre: es la cantidad de azufre en partes por millón (ppm) que posee el diésel premium, se sabe que un elevado contenido de este elemento químico es perjudicial tanto para la vida útil del motor como para sus emisiones contaminantes ya que ocasiona corrosión y desgaste en las piezas del motor además de generar una mayor cantidad de material particulado (PM) [12] y de óxido de azufre (SO_x) los cuales son nocivos tanto para el ser humano como para el medio ambiente. La norma ecuatoriana establece un contenido menor a 500 ppm [25]. A nivel internacional el azufre en el diésel automotriz es fuertemente regulado, así sus normativas establecen valores de entre 50 a 10 ppm de azufre, a largo plazo la tendencia mundial es alcanzar las 10 ppm de azufre [26].

Punto de Inflamación: o nivel de ignición es la temperatura a partir de la cual la mezcla de aire combustible es capaz de iniciar la reacción. La temperatura debe ser superior a los 51°C , ya que con valores inferiores se presentan problemas de encendido rápido ocasionando perforaciones en los pistones y se incrementan las dificultades tanto como el manejo, el almacenamiento y el transporte del combustible [25]. El punto de inflamación de un biodiésel es 50% más alto que el del diésel, las mezclas de diésel-biodiésel poseen un punto de inflamación promedio de 107°C , lo que indica un incremento de 68% en comparación con el combustible diésel [17]. Pero a elevadas temperaturas se producen mayores óxidos de nitrógeno [13]; puesto que existe una relación directa entre el aumento de temperatura del motor con la generación de NO_x .

Cantidad de Agua y Sedimentos: el diésel al ser originario de la refinación petrolera contiene per se impurezas como agua, ácidos grasos libres, glicerina, ácidos libres, metales y partículas sólidas. Si las partículas son suficientemente duras y en cantidades considerables, pueden ocasionar desgastes prematuros en bombas e inyectores. Este tipo de partículas generalmente aparecen como cenizas [20].

Entonces las propiedades tanto físicas como químicas juegan un papel importante dentro de la calidad del combustible ya que estas afectan de manera directa al funcionamiento del motor, sistema de inyección y combustión, y por consecuencia a su desempeño, esto conlleva a mayores emisiones de gases contaminantes, disminución de potencia, de torque y a un mayor consumo de combustible; lo cual incide tanto en el usuario como en el fabricante y por ende al medio ambiente.

A continuación, en la Tabla 1.1. se indica la relación existente entre las propiedades del combustible y el desempeño mecánico-ambiental del motor de combustión interna; haciendo énfasis en la potencia, consumo de combustible, emisión acústica, humos y emisiones contaminantes.

Tabla 1. 1. Propiedades del combustible diésel que afectan al desempeño mecánico y ambiental.

Desempeño	Propiedad del combustible
Potencia	Densidad, Viscosidad
Consumo de combustible	Densidad, Poder calorífico, Número de cetano
Ruido	Destilación, Viscosidad, Número de cetano, Estabilidad*, Composición
Humos	Densidad, Viscosidad
Emisiones	Viscosidad, Destilación, Contenido de azufre, Número de cetano, Estabilidad*, Composición
*Efectos indirectos atribuidos a fenómenos como el bloqueo por deposición de carbón en el inyector producido por la descomposición del diésel.	

Fuente: [27]

A continuación se presenta un extracto de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012 “Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos”; en la cual se puede observar las distintas propiedades con las cuales cuenta el diésel premium a nivel nacional.

Tabla 1. 2. Requisitos del Diésel Premium.

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51.0	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0.05	NTE INEN 1494
W contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0.15	NTE INEN 1491
W contenido de cenizas	%	-	0.01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	2.0	5.0	NTE INEN 810
Contenido de azufre	ppm	-	500	ASTM 4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45.0	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel, φ Biodiésel*	%	5	10	EN 14078
*Se debe considerar este parámetro siempre y cuando el diésel esté adicionado con biodiésel.				

Fuente: [28]

Entonces el cambio de las propiedades tanto físicas como químicas del combustible, diésel de origen fósil, genera variaciones en el desempeño mecánico del motor y de sus emisiones; es por esta razón que las mezclas con biocombustibles resultan atractivas desde el punto de vista ecológico ya que minimizan el impacto ambiental a comparación del combustible convencional.

1.2.3. Biocombustibles

De manera general los biocombustibles o biocarburantes se definen como combustibles obtenidos de la biomasa, cultivos agrícolas como aceite de palma, soja, caña de azúcar, etc., o de los residuos orgánicos. El combustible producido es líquido y se lo puede utilizar en los motores de combustión interna [29].

Los biocombustibles son de dos tipos:

Biodiésel: sustituto parcial o total del diésel de origen fósil el cual se produce a partir de plantas como el girasol, la palma, soja, entre otras.

Bioetanol: sustituto parcial o total de la gasolina el cual se encuentra hecho a partir de la caña de azúcar, trigo, avena y remolacha.

A continuación en la Figura 1.3. se muestra un diagrama con los combustibles alternativos para motores a gasolina y diésel.

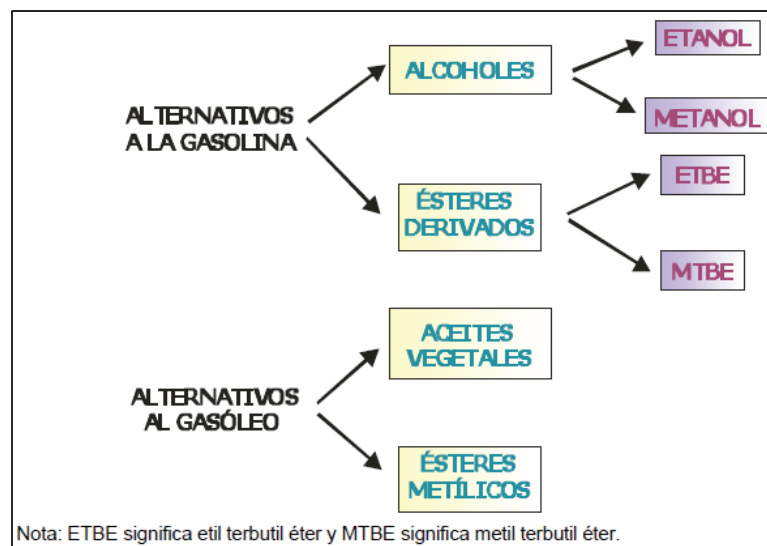


Figura 1. 3. Clasificación de los biocombustibles a gasolina y diésel.

(Fuente: [13])

Existen cuatro generaciones de biocombustibles que se encuentran enfocadas en no perjudicar la producción de cultivos destinados a la alimentación humana, las cuales son:

Primera generación: biocombustibles generados de cultivos alimentarios; los cuales son cultivados con el único fin de producir combustible.

Segunda generación: biocombustibles fabricados de varios tipos de biomasa ya sea vegetal o animal.

Tercera generación: biocombustibles originados por el uso de algas.

Cuarta generación: biocombustibles producidos en tierras no cultivables.

El biodiésel es un biocombustible formado por ésteres de ácidos grasos, provenientes de aceites vegetales o grasas animales [30], [31]. Posee características similares al diésel, que se presta a sustituirlo parcial o totalmente como combustible, puesto que su uso representa una excelente opción desde el punto de vista ecológico al reducir las emisiones de dióxido de carbono [32]. Los procesos de obtención de biodiésel son: pirólisis, micro-emulsión, ultrasonido, microondas, transesterificación y supercrítico. La transesterificación es el principal método para la producción eficiente de biodiésel en todo el mundo, consiste en reaccionar alcohol con aceites triglicéridos formando ésteres monoalquílicos; los cuales son conocidos como biodiésel, todo esto con ayuda de un catalizador [33]. El método supercrítico es un método alternativo de transesterificación en el cual los reactivos reaccionan sin catalizador por lo que la purificación de los productos será simple y sin generación de agua residual, en este proceso los valores de temperatura y presión de trabajo superan los puntos críticos del alcohol que reacciona con el ácido graso [33], [34]. El presente trabajo se enfoca en el biodiésel de primera generación, a saber, biodiésel producido a base de aceite crudo de palma mediante el proceso de transesterificación supercrítica.

1.2.4. Propiedades físicas y químicas del biodiésel

Las propiedades del biodiésel dependen de su materia prima y del proceso de transformación del mismo; en Ecuador aún no existen normas que rijan tanto las propiedades como el uso del biodiésel en motores de combustión interna; por eso el presente trabajo tomará normas internacionales que establecen los requerimientos de las propiedades del biodiésel; estas son la ASTM D6751-08, D7467-08, su diferencia radica en que la primera es para biocombustible B100 y la segunda es para mezclas de entre B6 (6% de biodiésel y 94% de diésel de origen fósil) a B20 (20% de biodiésel y 80% de diésel de origen fósil), y la EN 14214; dichas propiedades, físicas y químicas, se encuentran en la Tabla 1.3.

Las propiedades del biodiésel y de sus mezclas con diésel, tales como: alto contenido de oxígeno, bajo contenido de hidrocarburos aromáticos, disminución de azufre y

aumento en el número de cetano, hacen que al ser usados en los motores se reduzcan potencialmente las emisiones de SO_x, CO, HC, PM y opacidad en comparación con el diésel de origen fósil, no obstante, las emisiones de NO_x se incrementan ligeramente [17], [7].

Tabla 1. 3. Propiedades del Biodiésel.

Propiedades	Unidad	EN 14214	ASTM D6751	ASTM D7467
Punto de Inflamación, mín.	(°C)	≥ 120	100 - 170	52
Punto de Nube	(°C)	*	- 3 a - 12	*
Punto de Fluidez	(°C)	*	- 15 a - 16	*
Viscosidad Cinemática a 40 °C	(mm ² /s)	3.5 - 5.0	1.9 - 6.0	1.9 – 4.1
Gravedad Específica a 15 °C	(kg/lit)	0.86 - 0.90	0.88	*
Densidad a 15 °C	(kg/m ³)	860 - 900	820 - 900	*
Punto de Taponamiento del Filtro en Frío	(°C)	*	5	*
Temperatura de Destilación	(°C)	*	360	343
Temperatura de Ebullición	(°C)	*	100 - 615	*
Número de Cetano, mín.		47	47	40
Índice de Yodo, máx.		120	*	*
Índice de Acidez, máx.	(mgKOH/g)	0.50	0.50	0.3
Contenido de Cenizas	(%peso)	*	0.02	0.01
Contenido de Cenizas Sulfatadas, máx.	(%m/m)	0.02	0.02	*
Estabilidad a la Oxidación, mín. a 110 °C	(h)	6	3	6
Agua y Sedimentos, máx.	(%volumen)	0.03	0.05	0.05
Residuo de Carbono, máx.	(%m/m)	0.3	0.05	0.35
Contenido máximo de Agua, máx.		500 (mg/kg)	0.03 (v/v)	*
Glicerina Libre, máx.	(%masa)	0.02	0.02	*
Glicerina Total, máx.	(%masa)	0.25	0.24	*
Contenido de Azufre, máx.		10 (mg/kg)	0.05% (m/m)	15 (ug/g)
Contenido de Fósforo, máx.		10 (mg/kg)	0.001% (m/m)	*
Índice de Saponificación, máx.	(mgKOH/g)	*	370	*
Contaminación Total, máx.	(mg/kg)	24	*	*
* No especificado				

Fuente: [35], [36], [37], [38], [39].

1.2.5. Incidencia del biocombustible en motores diésel

El uso de combustibles ha incrementado la preocupación por sus emisiones de escape, en especial las emisiones de material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x) y

humo. Es por esto que los estándares de emisiones vehiculares son cada vez más estrictos a lo largo de los años. Esta medida adoptada por la comunidad mundial es necesaria para hacer frente al cambio climático y por ende reducir la cantidad de emisiones perjudiciales para la salud humana.

Los biocombustibles de aceites vegetales han sido ocupados en motores diésel en varias concentración que van de B0, 0% de biodiésel con 100% de diésel, a B100, 100% de biodiésel con 0% de diésel, respectivamente, algunos investigadores probaron biodiésel con y sin modificaciones al motor.

A continuación, se presentan algunas investigaciones de alto impacto publicadas en revistas Q1 a nivel mundial enfocadas en el efecto del biodiésel obtenido de aceite de palma en los motores diésel y su incidencia en las emisiones contaminantes de gases de escape.

Tabla 1. 4. Incidencia de biodiésel de aceite de palma en las emisiones de gases de escape en la última década.

Autores	Año	Trabajo	País	Mezclas	Motor	Emisiones*				
						HC	CO	CO2	NOx	PM
Nidal H. & Khaled A.	2015	"A comparative study of almond and palm oils as two bio-diesel fuels for diesel engine in terms of emissions and performance"	Arabia Saudita	B10	Estacionario de 4 cilindros	↓	↓	-	↓	↓
				B30		↓	↓	-	↓	↓
				B50		↓	↓	-	↓	↓
Mohamed M., Ashok T., Mohanraj T. & Chandramouli R.	2018	"A comparative study on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel blends with and without an additive"	India	B20	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
				B20 +DTBP		↓	↓	-	↓	-
Nalgundwar A., Paul B. & Kumar S.	2016	"Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropa"	India	BP5J5	Estacionario de 1 cilindro	-	↓	↑	↑	-
				BP10J10		-	↓	↑	↑	-
				BP15J15		-	↓	↓	↑	-
				BP20J20		-	↓	↓	↑	-
				BP25J25		-	↓	↓	↑	-
				BP30J30		-	↓	↓	↑	-
				BP40J40		-	↓	↓	↑	-
BP50J50	-	↓	↓	↑	-					
Senthur S., Asokan M., Prathiba S.,	2018	"Effect of additives on performance, combustion and emission behavior"	India	B20	Estacionario de 1 cilindro	↑	↓	-	↑	-
				B30		↓	↓	-	↑	-
				B40		↑	↓	-	↓	-

Ahmed S. & Puthean G.		of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine"		B20+BHT		↓	↓	-	↓	-
				B20+Butanol		↑	↓	-	↓	-
Imtenan S., Masjuki H., Varman M., Arbab M., Sajjad H. & Ashrafur S.	2014	"Impact of oxygenated additives to palm and jatropa biodiesel blends in the context of performance and emissions characteristics of a light-duty diesel engine"	Malasia	B20	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
				B15E5		=	↓	-	↓	-
				B15BU5		=	↓	-	↓	-
				B15DE5		=	↓	-	↓	-
Ashrafur A., Masjuki H., Kalam M., Rashedul H., Sajjad H. & Abedin M.	2014	"Influence of anti-corrosion additive on the performance, emission and engine component wear characteristics of an IDI diesel engine fueled with palm biodiesel"	Malasia	B8	Estacionario de 4 cilindros	↓	↓	-	↑	-
				B16		↑	=	-	↑	-
				B8A		↓	↓	-	↓	-
				B16A		↓	↓	-	↓	-
Abedin M., Masjuki H., Kalam M., Sanjid., Ashrafur S. & Rizwanul I.	2014	"Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropa biodiesel blends in a diesel engine"	Malasia	B50	Estacionario de 4 cilindros	↓	↓	-	↓	-
				B10		↓	↓	-	↓	-
				B20		↓	↓	-	↓	-
Sanjid A., Masjuki H., Kalam M., Ashrafur S., Abedin M. & Palash S.	2014	"Production of palm and jatropa based biodiesel and investigation of palm-jatropa combined blend properties, performance, exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine"	Malasia	B10	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	↑	↑	-
				B5J5		↓	↓	=	↑	-
				B20		↓	↓	↑	↑	-
				B10J10		↓	↓	↑	↑	-
Vieira da Silva M., Gil B., Guilherme da Costa L., Soarea A & Vasconcelos M.	2017	"Comparative study of NOx emissions of biodiesel-diesel blends from soybean, palm and waste frying oils using methyl and ethyl transesterifications routes"	Brasil	B20PM	Motor estacionario de 4 cilindros	-	-	-	↓	-
				B20PE		-	-	-	↓	-
				B50PE		-	-	-	↓	-
				B50PM		-	-	-	↓	-
Mofijur M., Masjuki H., Kalam M., Atabani A., Fattah I & Mobarak H.	2014	"Comparative evaluation of performance and emission characteristics of moringa oleifera and palm oil based biodiesel in a diesel engine"	Malasia	B5	Estacionario de 4 cilindros	↓	↓	↑	↑	-
				B10		↓	↓	↑	↑	-

* En comparación a las emisiones generadas por la combustión del diésel de origen fósil	
-	No especificado por los autores
=	Presenta valores similares a las emisiones del diésel de origen fósil
	Mejor mezcla según sus investigadores
(DTBP) Di-Ter-Butil Propano empleado como aditivo	(J) Aceite de Jatropha y su concentración volumétrica
(B) Biodiesel de aceite de palma y su concentración volumétrica	(BHT) 2(3) Ter-Butil-4-Metoxifenol
(P) Aceite de Palma y su concentración volumétrica	(E) Etanol
(BU) Butanol	(PM) Palm Methyl
(DE) Dietil éter	(PE) Palm Ethyl
(A) Aditivo IRGALUBE 349	

Fuente: [40], [41], [18], [42], [43], [44], [21], [45], [46], [47].

De la Tabla anterior se puede evidenciar que en todos los casos se reduce el monóxido de carbono, los HC por su parte muestran una tendencia a decrecer con el uso del biodiésel aunque existen investigaciones que demuestran lo contrario, el dióxido de carbono muestra una tendencia creciente, los NO_x por otra parte en ciertas investigaciones aumentan y en otras disminuyen por lo que el uso del biodiesel en esta parte es un poco incierto y finalmente el material particulado no sido muy reportado por los investigadores; no obstante pocas investigaciones afirman la disminución del mismo cuando se emplea biocombustibles. Una forma de minimizar el incremento de NO_x generado por el uso de biocombustibles es utilizar aditivos, entre uno de estos se encuentra el óxido de cerio ya que actúa como un catalizador disminuyendo la generación de los óxidos de nitrógeno.

1.2.6. Aditivos

Los aditivos para motores diésel son productos químicos que actúan dentro del motor facilitando la combustión, limpiando sus componentes internos, depurando el circuito de inyección e incluso el circuito de refrigeración; según sus distintos fabricantes.

Aunque una opinión técnica, segura, confiable y estandarizada no existe; no obstante sus fabricantes aseguran la eficacia de sus productos, por otra parte los fabricantes de motores no los suelen recomendar; pero a pesar de lo anteriormente mencionado la decisión de su uso o no dentro del motor es de total responsabilidad del propietario del automotor. A continuación se detallan los tipos de aditivos según su función específica dentro del motor; entre estas se encuentran los aditivos anticongelantes, aditivos limpiadores de partículas, aditivos antihumos y aditivos que aseguran mejorar la calidad del combustible diésel.

Tipos de aditivos [48]:

- **Anticongelante:** regula la temperatura del líquido refrigerante del motor, ya que este evitará que se congele el mismo o que eleve su temperatura más de lo debido.
- **Limpiador:** elimina partículas y sedimentos incrustados en los circuitos internos y esto genera una mejor combustión.
- **Antihumos:** reduce la formación de residuos en el sistema de admisión y también reduce los gases contaminantes.
- **Mejorador de la calidad del combustible:** tiene el objetivo de elevar el cetanaje, por ende reducir el consumo y mejorar el rendimiento del automotor.

El presente trabajo analizará y evaluará el uso de un aditivo con mezclas de diésel de origen fósil y con mezclas de biocombustible; el aditivo que se usará es el óxido de cerio (CeO_2) ya que este actúa como un regulador de oxígeno puesto que absorbe oxígeno para la reducción de NO_x y además proporciona oxígeno para la oxidación de HC y CO [7], también disminuye el PM [49] y al mismo tiempo el porcentaje de opacidad reduce en un 40% [8].

1.2.7. Propiedades físicas y químicas del aditivo

El óxido de cerio (CeO_2) es una fuente de cerio térmicamente estable y altamente insoluble, adecuado para aplicaciones ópticas, cerámicas y de vidrio. El óxido de cerio se origina de la calcinación del oxalato de cerio o hidróxido de cerio. Sus numerosas aplicaciones abarcan desde la metalurgia, vidrios, cerámicas, fósforos y catalizadores. En la fabricación de acero se emplea el óxido de cerio con la finalidad de eliminar el oxígeno y azufre libre formando oxisulfuros estables en polvo de alta pureza [50]. Y dentro de los motores de combustión interna se los emplea como aditivo que actúa como catalizador y reduciendo principalmente las emisiones de óxidos de nitrógeno generado en el proceso de combustión.

El departamento de materiales de la Universidad de Barcelona establece las siguientes propiedades para el óxido de cerio [51], ver Tabla 1.5.

Tabla 1. 5. Propiedades del Óxido de Cerio.

Propiedades	Unidad	Universidad de Barcelona – Dep. Materiales	Elementos Americanos
Densidad	(g/cm ³)	7.215 – 7.65	7.6
Peso Molecular	(g/mol)	172.115	171.985
Temperatura de Fusión	(°C)	2100	2340
Temperatura de Ebullición	(°C)	3500	3500
Apariencia		*	Polvo amarillo o blanco
Poder Calorífico	(J/kgK)	*	390
Propiedades Químicas		Insoluble en Agua	Insoluble en Agua
Aplicaciones	Pulido de lente ópticos y joyas. Convertidores catalíticos en automoción; reduce las emisiones de NO_x y mejora la conversión de CO a CO₂		Metalurgia, vidrios y su pulido, cerámicos, catalizadores y en fósforos. Manufactura de acero.
*No especificado			

Fuente: [50], [51].

1.2.8. Incidencia del óxido de cerio como aditivo en motores diésel

El óxido de cerio (CeO₂) ha sido empleado en varias investigaciones experimentales en diferentes concentraciones (5, 10, 15, 25, 30, 40, 45, 50, 80, 90 y 100 ppm) con el fin de disminuir tanto las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos quemados o sin quemar así como las emisiones de óxidos de nitrógeno en las cuales se han reportado disminuciones de entre el 13% al 60% [52], [53]. En la Tabla 1.6. se muestran algunas investigaciones que emplearon mezclas de diésel con óxido de cerio en donde es apreciable la incidencia del aditivo en las emisiones contaminantes.

Tabla 1. 6. Incidencia del Óxido de Cerio en las emisiones contaminantes.

Autores	País y año	Trabajo	Comb.	Aditivo	Mezclas	Motor	Emisiones*				
							HC	CO	CO ₂	NO _x	PM
Jiaqiang E., Zhang Z., Chen J., Pham M., Zhao X., Peng Q., Zhang B. & Yin Z. [49]	China 2018	"Performance and emission evaluation of a marine diesel engine fueled by water biodiesel-diesel emulsion blends with a fuel additive of a cerium oxide"	Diésel + Biodiésel de colza	Agua y CeO ₂ 90 ppm	B5W2	Estacionario de 4 cilindros	↓	↓	↑	↑	↓
					B5W4		↓	↓	↑	↓	↓
					B5W6		↑	↓	↑	↓	↓
					B5W2C		↓	↓	↑	↓	↓
					B5W4C		↓	↓	↑	↓	↓
					B5W6C		↓	↓	↑	↓	↓
Selvan V., Anand R. & Udayakumar M. [7]	India 2014	"Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne"	Diesterol (diésel - castor biodiésel - etanol)	CeO ₂ y Nanotubos de Carbono 25, 50 y	B20	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↓	↓
					B20 + C25 + CNT25		↓	↑	-	↑	-

		additives in diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine"		100ppm	B20 + C50 + CNT50		↓	↑	-	↓	-
					B20 + C100 + CNT100		↓	↑	-	↓	-
Selvan V., Anand R. & Udayakumar M. [54]	India 2009	"Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a ci engine"	Diésel, diésel + castor biodiésel + etanol	CeO ₂ de 25ppm	DC25	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
					D70 + B10 + E20		↑	↓	-	↑	-
					D70 + B10 + E20 + C25		↓	↓	-	↑	-
Sajith V., Sobhan C. & Peterson G. [55]	India 2010	"Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel"	Jatropha Biodiésel	CeO ₂ de 40 y 80ppm	B100 + C40	Estacionario de 1 cilindro	↓	↑	-	↓	-
					B100 + C80		↓	↑	-	↓	-
Appavu P., Ramanan M. [56]	India 2018	"Study of emission characteristics of a diesel engine using cerium oxide nanoparticle blended pongamia methyl ester"	Diésel, Pongamia a metil éster	CeO ₂ de 50 y 100ppm	PME	Estacionario de 2 cilindros	↓	↓	-	↓	-
					PME + C50		↓	↓	-	↓	-
					PME + C100		↓	↓	-	↓	-
Thirumal B., Gunasekaran E., Loganathan. & Saravanan C. [53]	India 2015	"Emission reduction from a diesel engine fueled cerium oxide nano-additives using scr with different metal oxides coated catalytic converter"	Diésel	CeO ₂ de 25 y 50ppm	D+C25	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↓	-
					D+C50		↓	↓	-	↓	-
Anbarasu A. & Karthikeyan A. [57]	India 2016	"Performance and emission characteristics of a diesel engine using cerium oxide nanoparticle blended biodiesel emulsion fuel"	Diésel + emulsión de biodiésel de canola + agua	CeO ₂ de 50 ppm	B100	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
					EB100		↓	↓	-	↑	-
					EB100 + C50		↓	↓	-	↓	-
Pandey U., Nandgaoankar M., Pandey	India 2018	"The effect of cerium oxide nano particles fuel additive on	Diésel, biodiésel de karanja	CeO ₂ de 45 ppm	B100	Estacionario de 12 cilindros	↓	↓	-	↑	↓

U. & Sandesh U. [58]		performance and emission of karanja biodiesel fueled compression ignition military 585kw heavy duty diesel engine"			B100 + C45		↓	↓	-	↓	↓
Joshua M. & Gowdharm D.	India 2016	"Emission characteristics of cerium oxide nanoparticle blended emulsified biodiesel"	Diésel + emulsión de biodiésel de canola	CeO ₂ de 50 ppm	B20 + C50	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
					B40 + C50		↓	↓	-	↑	-
					B60 + C50		↓	↓	-	↑	-
					B100 + C50		↓	↓	-	↑	-
Prabu A. & Anand R. [52]	India 2016	"Emission control strategy adding alumina and cerium oxide nano particle in biodiesel"	Diésel, Biodiésel de jatropa	Al ₂ O ₃ y CeO ₂ de 5, 15 y 30 ppm	B100	Estacionario de 1 cilindro	↓	↓	-	↑	-
					B100 + A5 + C5		↓	↓	-	↓	-
					B100 + A15 + C15		↓	↓	-	↓	-
					B100 + A30 + C30		↓	↓	-	↓	-

* En comparación a las emisiones generadas por la combustión del diésel de origen fósil

-	No especificado por los autores
=	Presenta valores similares a las emisiones del diésel de origen fósil
	Mejor mezcla según sus investigadores
(B) Biodiésel y su concentración volumétrica	(C) Óxido de Cerio CeO ₂ y su concentración en ppm
(W) Agua y su concentración volumétrica	(CNT) Nanotubos de Carbono
(D) Diésel y su concentración volumétrica	(E) Etanol y su concentración volumétrica
(PME) Pongamia metil éster	(EB) Biodiésel emulsificado y su concentración volumétrica
(C) Alúmina Al ₂ O ₃ y su concentración en ppm	

Fuente: [49], [8], [54], [55], [56], [53], [57], [58], [59], [52].

Entonces de la Tabla anterior se puede notar la tendencia de disminución que presentan tanto los hidrocarburos (HC) seguidos del monóxido de carbono (CO) al emplear el óxido de cerio como aditivo, por otra parte las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) tienden a reducir en numerosas investigaciones, no obstante, existen algunas otras que demuestran el incremento de los NO_x al utilizar el óxido de cerio, las emisiones de CO₂ no han sido muy reportadas pero el CeO₂ al ser oxigenado tiende a mejorar la combustión y por ende aumentar el dióxido de carbono, y finalmente el material particulado tiende a disminuir cuando se aditiva el diésel con óxido de cerio. Se debe notar que las investigaciones fueron llevadas a cabo con óxido de cerio pero en diferentes concentraciones.

1.3. Emisiones contaminantes de un motor diésel

Los contaminantes pueden ser primarios y secundarios, se dice que son contaminantes primarios cuando son emitidos directamente desde la fuente y contaminantes secundarios cuando se forman en la atmósfera por reacciones entre los contaminantes primarios. Independientemente de que tipo de contaminante sea se sabe que todos afectan al entorno y a la salud humana de la siguiente manera: alteración de las propiedades atmosféricas, daños en la vegetación, deterioro de los materiales y construcciones además de un generar un eminente incremento de las enfermedades en los seres humanos [10].

Producto de la combustión del diésel de origen fósil se generan gases contaminantes, entre los cuales se tiene: hidrocarburos no quemados o parcialmente quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO) y por ende dióxido de carbono (CO_2); los mismos que salen despedidos del tubo de escape del motor durante toda su vida útil.

1.3.1. Hidrocarburos (HC)

Estos se generan por una combustión incompleta, de ahí proviene el nombre de hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados, se encuentran compuestos por hidrógeno y carbono, de entre los cuales se tiene aldehídos, alcanos, alquenos, entre otros. Cuando los HC entran en contacto con la luz solar en presencia de NO_x se produce el ozono troposférico O_3 , además se genera el smog fotoquímico el cual es el causante de la contaminación en el aire y puede llegar a ser cancerígeno [25].

1.3.2. Óxidos de azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre contribuyen a la formación de la lluvia ácida, estos son generados tanto por los motores de ciclo otto como los motores de ciclo diésel, no obstante estos últimos generan hasta diez veces más SO_x que los primeros. Los gases de escape contienen niveles superiores a las 20 ppm de dióxido de azufre (SO_2) los cuales al hacer contacto con el aire externo forman el trióxido de azufre (SO_3); los mismos que al hacer contacto con el vapor de agua en la atmósfera forman el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido sulfuroso (H_2SO_3); los cuales son responsables de generar la lluvia ácida [14].

1.3.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los NO_x comprenden al óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido nitroso (N₂O) que se producen en mayor cantidad, respectivamente [14]. El óxido nítrico (NO) es uno de los principales responsables de las lluvias ácidas y del smog fotoquímico, posee un olor penetrante y suele ser de color marrón rojizo, puede irritar los pulmones y reducir su resistencia a enfermedades infecciosas si el nivel supera a los 600mg/m³. Además los NO participan en la reducción de ozono en la estratósfera lo cual implica el paso directo de la radiación solar ultravioleta hacia la superficie terrestre [24].

El dióxido de nitrógeno (NO₂) comprende entre un 10 al 30% de las emisiones totales de NO_x, lo cual en conjunto con los NO contribuyen en la formación de la lluvia ácida y del smog fotoquímico [10].

El óxido nitroso (N₂O) es un gas causante del efecto invernadero ya que posee una facilidad y estabilidad para atravesar la atmósfera y participar en la química del deterioro del ozono estratosférico.

1.3.4. Material particulado (PM)

Es procedente de una combustión incompleta, se encuentra en estado sólido en forma de partículas o en forma de gotas cuando se encuentra en estado líquido. El PM se clasifica según su tamaño, así: PM₁₀ cuando las partículas poseen un diámetro de entre 2.5 a 10 micras y se sabe que su tiempo de vida en la atmósfera es de minutos hasta horas, y el PM_{2.5} son partículas con un tamaño inferior a las 2.5 micras, se conservan en el aire por un periodo de tiempo mayor y además recorren trayectos más largos que las PM₁₀ [25]. En la Figura 1.4. se puede observar la formación de material particulado partiendo desde el sistema admisión del motor hasta llegar al exterior por medio del tubo de escape [10].

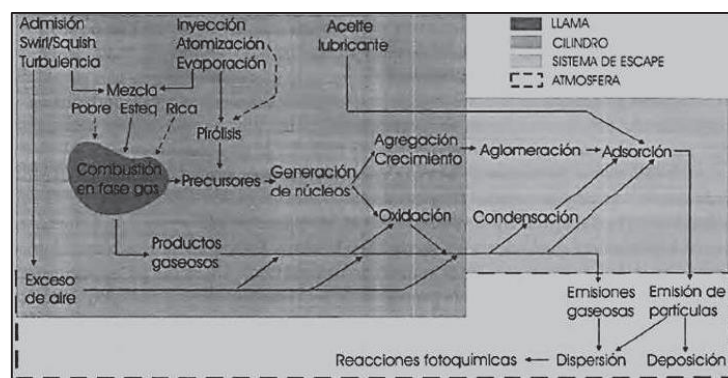


Figura 1. 4. Esquemas de formación y emisión de partículas.

(Fuente: [10])

El tamaño del material particulado es de interés desde el punto de vista de la salud ya que las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ generan efectos nocivos en el sistema respiratorio, se ha encontrado que las partículas ultrafinas (<0,1µm) poseen una alta toxicidad al interacciones con membranas celulares [60]. En la Figura 1.5. se muestra la distribución del tamaño y número de partículas.

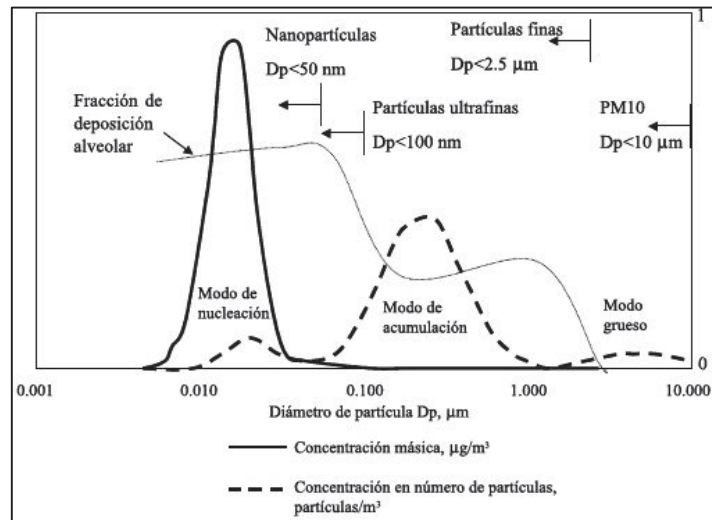


Figura 1. 5. Distribución del tamaño de partículas.

(Fuente: [60])

1.3.5. Monóxido de carbono (CO)

En motores diésel la formación del monóxido de carbono proviene de dos fuentes. La primera la constituyen zonas pobres que no son capaces de soportar una rápida combustión, ya que la llama no puede propagarse a través de ellas y se forman productos procedentes de la pirólisis y oxidación parcial del combustible. La segunda fuente son zonas ricas que son incapaces de mezclarse con la suficiente cantidad de aire para producir la oxidación del combustible.

Adicionalmente el CO al ser un gas incoloro e inodoro es letal en bajas dosis ya que se mezcla con la hemoglobina de la sangre de manera rápida lo cual reduce la capacidad de la misma para transportar oxígeno generando somnolencia en los seres vivos y cuando este entra en contacto con la atmósfera se produce el CO₂, el cual es un gas acusado del efecto invernadero.

A continuación se muestran los principales gases de escape contaminantes, su descripción, sus principales características, su formación y efectos; además en la Tabla 1.7. se muestra un resumen de los mismos.

Tabla 1. 7. Contaminantes del motor diésel.

Gas contaminante	Descripción	Características	Formación	Efectos
Óxidos de Azufre (SO _x)	Se encuentra en combustibles líquidos, en forma de compuesto orgánico o inorgánico. Forma los SO _x y genera material particulado.	Color amarillento y olor penetrante.	Se forma cuando la mezcla es demasiado rica o demasiado pobre. Altas temperaturas de combustión.	Irritación e inflamación del sistema respiratorio, cardiovascular, afecciones e insuficiencias pulmonares, alteración del metabolismo de las proteínas, dolor de cabeza o ansiedad.
Hidrocarburos (HC)	Los compuestos más abundantes en las emisiones de HC son los alquenos, seguidos de los alcanos y los aromáticos (HAPs).	Composición muy heterogénea. Los HAPs son sólidos a temperatura ambiente, son de baja volatilidad, se encuentran en el aire, tierra, agua procedentes de fuentes naturales o antropogénicas.	Son ocasionados por una combustión incompleta. Por el apagado de la llama efecto pared o por misjiring (insuficiente evaporación del combustible) fugas de escape, combustible atrapado, dosados externos.	Irritación de ojos, cansancio y tendencia a toser. Formación de hollín. Los HAPs son cancerígenos o mutagénicos y además causan enfermedades pulmonares.
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	Es la suma de contaminantes como Monóxido de Carbono (NO), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) y Óxidos nitrosos (N ₂ O, NO ₃ , N ₂ O ₃).	Color rojizo y olor penetrante.	Oxidación atmosférica molecular del nitrógeno. Elevadas temperaturas.	Lluvia ácida, smog fotoquímico, enfermedades infecciosas y reducción del ozono.
Monóxido de Carbono (CO)	Principal contaminante en el ambiente.	Incoloro e inodoro.	Por el dosado (mezclas ricas y/o pobres). Temperaturas altas. Oxidación del Carbono (C).	Disminuye el oxígeno (O ₂) en la sangre, en altas concentraciones produce la muerte, dolor de cabeza, cansancio. Gases de efecto invernadero.

Fuente: [10], [12].

Entonces para determinar la cantidad de emisiones contaminantes detalladas anteriormente ya sea en concentraciones volumétricas o en factores de emisión se utilizan los ciclos de conducción que se detallan a continuación.

1.4. Ciclos de conducción

Un ciclo de conducción es un perfil de velocidades trazado en un plano velocidad-tiempo, lo cual representa una forma típica de conducir en una ciudad o carretera, considerando la tecnología del automotor, características del tráfico, de las vías, y condiciones climáticas, entonces un ciclo de manejo es una herramienta útil si es dinámica para evaluar tanto el consumo de combustible como las emisiones contaminantes del auto transporte [61].

Un ciclo de conducción es la herramienta más usada a la hora de realizar ensayos de homologación vehicular haciendo énfasis en el consumo de combustible y en las emisiones contaminantes, esto con el uso de un dinamómetro, los resultados obtenidos suponen una influencia en las ventas de un determinado vehículo [24].

Existen varios ciclos de conducción como los siguientes:

- Federal Test Procedure (FTP-75)
- New European Driving Cycle (NEDC)
- Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)
- The Artemis driving cycle (Urban, Rural and Highway)
- The 10-15 mode cycle
- Inspection & Maintenance Driving Cycle (IM-240); entre otros.

1.4.1. Ciclo de Conducción IM-240

Es un programa de dinamómetro de chasis desarrollado y recomendado por la EPA de los Estados Unidos para ensayos de emisiones de vehículos livianos con programas de inspección y mantenimiento, consiste en una prueba de 240 segundos que representan una ruta de 3.2 km. con una velocidad media de 47.3 km/h y una velocidad máxima de 91,2 km/h, su diagrama velocidad versus tiempo se muestra en la Figura 1.6 [62].

En Estados Unidos se ha implementado y planean implementar en un futuro los programas de inspección y mantenimiento (I&M); con el fin de evaluar sus emisiones contaminantes, mejorar y controlar sus sistemas de emisiones de vapor mientras se lo conduce sobre un dinamómetro de chasis [63]. Dichos programas son los siguientes:

- Ciclo de conducción transitorio de 240 segundos “IM-240”
- Mediante Acceleration Simulation Mode (ASM) 2525.
- Un segundo ASM denominado ASM 5015.

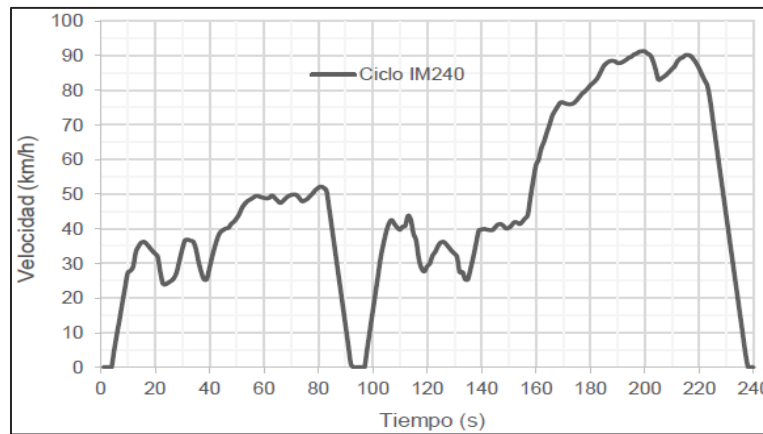


Figura 1. 6. Ciclo de conducción IM-240.

(Fuente: [24])

1.5. Factores de emisión

Es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una unidad de actividad o proceso ya sea de consumo de energía, unidades de producción o kilómetros recorridos. Para fuentes móviles es común que los factores de emisión se expresen como masa contaminante sobre distancia recorrida o consumo de combustible [64].

1.5.1. Métodos de obtención de los factores de emisión

- Método Directo: calcula las emisiones contaminantes de un vehículo en condiciones reales de operación, pero su costo en equipos es relativamente alto. Se tiene el uso de pruebas de dinamómetro, pruebas On Board y de sensor remoto.
- Método Indirecto: emplean los métodos directos con el debido ajuste a las condiciones teóricas de cada modelo de automóvil, son modelos internacionales. Los métodos más comunes son: COPERT, IVE, EMOD/CMAP, PART 5, MOVES, y el MOBILE 6 [65].

1.5.2. Cálculo de los factores de emisión [66]

Partiendo del modelo simplificado de la combustión, el mismo que representa la conversión de la mezcla aire combustible en sus principales productos se sabe que el CO, CO₂ y HC son resultados de la combustión puesto que contienen carbono y por

ende es posible desarrollar un balance de masa con respecto a la cantidad de carbono presente en el combustible y en estos tres productos de la combustión [65].

Además se necesita conocer tanto el peso molecular como la densidad del combustible lo cual permite calcular la cantidad de CO, NO_x y HC emitidos por unidad de combustible quemado, posteriormente se debe introducir el consumo de combustible para que el factor de emisión quede expresado en cantidad de contaminante emitido por distancia recorrida.

Asumiendo:

- El carbono del combustible es emitido en forma de CO, CO₂ o como un hidrocarburo no quemado equivalente al propano (C₃H₆).
- El cálculo se basa en cantidades estequiométricas del aire.
- Se toma en consideración como productos de combustión al NO y N₂.

Para el cálculo del modelo de combustión se inicia con el desarrollo de una fórmula molecular equivalente para el combustible, en la Tabla 1.8. se muestra dicho desarrollo para un combustible con un contenido del 80% de peso de carbono y el restante 20% en peso de hidrógeno; de lo cual se obtiene el CH₃.

Tabla 1. 8. Fórmula molecular equivalente.

Componente	Lb por 100 lb de combustible	Peso Molecular	Lb mol por 100 lb de combustible	Lb mol por lb mol de carbono
Carbono	80.00	12.00	6.67	1.0
Hidrógeno	20.00	1.00	20.00	3.0

Fuente: [66].

Por consiguiente, se puede deducir que el peso molecular del combustible se encuentra dado por la fórmula molecular equivalente CH_y, de la cual se tiene:

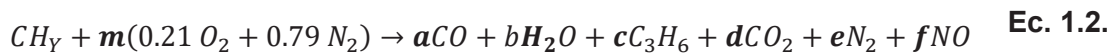
$$y = \left(\frac{\% \text{ peso H}}{\% \text{ peso C}} \right) \left(\frac{MW_C}{MW_H} \right) \quad \text{Ec. 1.1.}$$

Donde:

MW_C = peso molecular del carbono

MW_H = peso molecular del hidrógeno

El balance de masa para la combustión, despreciando el exceso de oxígeno y considerando como productos al CO, H₂O, C₃H₆, CO₂, N₂ y NO, se encuentra dado por:



Donde:

m = moles de aire por mol de combustible consumidos

a = moles formados de CO por mol de combustible consumido

b = moles formados de H₂O por mol de combustible consumido

c = moles formados de C₃H₆ por mol de combustible consumido

d = moles formados de CO₂ por mol de combustible consumido

e = moles formados de N₂ por mol de combustible consumido

f = moles formados de NO por mol de combustible consumido

Por tanto se obtienen las siguientes ecuaciones:

Elemento	Reactantes		Productos	
Carbono	1	=	a + 3c + d	Ec. 1.3.
Hidrógeno	y	=	2b + 6c	Ec. 1.4.
Oxígeno	0.42 m	=	a + b + 2d + f	Ec. 1.5.
Nitrógeno	1.58 m	=	2e + f	Ec. 1.6.

Con la ayuda de una prueba dinámica y un analizador de gases es posible conocer las concentraciones volumétricas de los distintos gases contaminantes, lo cual permite determinar las siguientes incógnitas.

$$R_{CO} = \left(\frac{CO}{CO_2} \right) = \frac{a}{d} \quad \text{Ec. 1.7.}$$

$$R_{HC} = \left(\frac{HC}{CO_2} \right) = \frac{c}{d} \quad \text{Ec. 1.8.}$$

$$R_{NO_x} = \left(\frac{NO_x}{CO_2} \right) = \frac{f}{d} \quad \text{Ec. 1.9.}$$

Donde:

R_{CO}, R_{HC} y R_{NO_x} son las razones de %CO a % CO₂, %HC a % CO₂ y %NO_x a % CO₂, respectivamente, se debe tomar en cuenta que tanto los HC como los NO_x son expresados en partes por millón (ppm) por lo cual se los debe transformar a valores porcentuales.

De la ecuación 1.7. se obtiene:

$$a = R_{CO} * d \quad \text{Ec. 1.10.}$$

De la ecuación 1.8. se obtiene:

$$c = R_{HC} * d \quad \text{Ec. 1.11.}$$

Reemplazando las ecuaciones 1.10 y 1.11 en la ecuación 1.3 se obtiene:

$$d = \frac{1}{1 + R_{CO} + 3R_{HC}} \quad \text{Ec. 1.12.}$$

Se puede obtener los factores de emisión (EF') en gramos de contaminante por gramo de combustible consumido, con los valores de a, c y f; así:

$$EF'_{CO} = a * \frac{MW_{CO}}{MW_{Fuel}} = \frac{R_{CO}}{1 + R_{CO} + 3R_{HC}} * \frac{MW_{CO}}{MW_{Fuel}} \quad \text{Ec. 1.13.}$$

$$EF'_{HC} = a * \frac{MW_{HC}}{MW_{Fuel}} = \frac{R_{HC}}{1 + R_{CO} + 3R_{HC}} * \frac{MW_{HC}}{MW_{Fuel}} \quad \text{Ec. 1.14.}$$

$$EF'_{NOx} = a * \frac{MW_{NOx}}{MW_{Fuel}} = \frac{R_{NOx}}{1 + R_{CO} + 3R_{HC}} * \frac{MW_{NOx}}{MW_{Fuel}} \quad \text{Ec. 1.15.}$$

Tomando en cuenta como base principal un combustible diésel, C₁₂H₂₆, (equivalente a CH_{2.17}) se procede a determinar el peso molecular del combustible.

$$MW_{Fuel} = \frac{12 \text{ g C}}{\text{mol C}} * \left(\frac{1 \text{ mol C}}{\text{mol Fuel}} \right) + \frac{1 \text{ g H}}{\text{mol H}} * \left(\frac{2.17 \text{ mol H}}{\text{mol Fuel}} \right) = 14.17 \frac{\text{g Fuel}}{\text{mol Fuel}}$$

Para finalizar se debe tomar en cuenta tanto la densidad del combustible ρ (g/m³) como el consumo de combustible por distancia recorrida FC (m³/km) [67]; y se obtiene el factor de emisión en gramos de contaminante por kilómetro recorrido, así:

$$EF = EF' * \rho * FC \quad \text{Ec. 1.16.}$$

$$EF_{CO} = \frac{g_{CO}}{km} = \frac{28 \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right]}{1 + \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right] + 3 \left[\frac{\%HC}{\%CO_2} \right]} * \left[\frac{\rho * FC}{14.17} \right] \quad \text{Ec. 1.17.}$$

$$EF_{HC} = \frac{g_{HC}}{km} = \frac{42 \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right]}{1 + \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right] + 3 \left[\frac{\%HC}{\%CO_2} \right]} * \left[\frac{\rho * FC}{14.17} \right] \quad \text{Ec. 1.18.}$$

$$EF_{NOx} = \frac{g_{NOx}}{km} = \frac{30 \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right]}{1 + \left[\frac{\%CO}{\%CO_2} \right] + 3 \left[\frac{\%HC}{\%CO_2} \right]} * \left[\frac{\rho * FC}{14.17} \right] \quad \text{Ec. 1.19.}$$

Al emplear un biocombustible en concentraciones parciales de volumen con diésel de origen fósil se reducen los factores de emisión en función del contenido de biocombustible [68], de la siguiente manera:

Factor de emisión	
Diésel	2.61 kgCO ₂ /litro
Biodiésel	2.61 kgCO ₂ /litro - %biodiésel

1.6. Regulación y control de emisión de gases contaminantes

1.6.1. Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire

Esta norma fue dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional. Tiene como principal fin el preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general [69].

La norma establece los siguientes puntos importantes:

- Contaminantes comunes del aire ambiente
- Concentraciones de contaminantes comunes
- Métodos de medición de concentración

1.6.1.1. Contaminantes comunes del aire ambiente

Se han fijado como contaminantes comunes del aire a los siguientes:

- Partículas sedimentables
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (PM₁₀)
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrones (PM_{2.5})
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O₃)

1.6.1.2. Concentraciones de los contaminantes comunes

A continuación, en la Tabla 1.9. se muestran las concentraciones máximas permitidas de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O₃) y dióxido de nitrógeno (NO₂) durante un lapso de tiempo determinado, según la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

Tabla 1. 9. Concentraciones de contaminantes comunes.

Contaminante	Concentración	Tiempo
Partículas sedimentables	1 mg/cm ²	30 días continuos
PM ₁₀	100 µg/m ³	24 horas
PM _{2.5}	50 µg/m ³	24 horas
SO ₂	125 µg/m ³	24 horas
CO	30000 µg/m ³	1 hora
O ₃	100 µg/m ³	8 horas
NO ₂	200 µg/m ³	1 hora

Fuente: [70]

1.6.1.3. Métodos de medición de concentración

Los métodos para la determinación de la concentración de contaminantes establecidos por el Ministerio de Ambiente del Ecuador en el año 2011 se detallan a continuación, ver Tabla 1.10.

Tabla 1. 10. Métodos de medición de concentración.

Nombre	Método
Partículas sedimentables	Gravimétrico, mediante captación de partículas en envases abiertos.
PM ₁₀	Gravimétrico, mediante muestreador de alto caudal o de bajo caudal.
PM _{2.5}	Gravimétrico, mediante muestreador de bajo caudal
SO ₂	Pararosanilina, absorción en medio líquido y análisis colorimétrico posterior.
CO	Analizador infrarrojo no dispersivo
O ₃	Quimiluminiscencia fotómetro ultravioleta
NO ₂	Quimiluminiscencia

Fuente: [70]

1.6.2. Normas de Emisiones

Los gases generados por la combustión interna de motores son la principal fuente de contaminación, sin embargo, el detener el crecimiento de automotores no es posible ni deseable, debido a aspectos tanto económicos como ventajas de movilidad. Por ende, el desafío es por una parte maximizar el beneficio del uso de vehículos y por otra parte minimizar su impacto adverso sobre el ambiente y la sociedad [66]; esto se lo logra

disminuyendo la masa del medio de transporte y con el desarrollo de sistemas pre y postcombustión, respectivamente.

En Europa, Norteamérica y otros países se han fijado estándares con el fin de disminuir el impacto de los gases emitidos por los motores de combustión interna al medio ambiente, los mismos que se vienen aplicando y tornándose más exigentes cada vez para la homologación de vehículos. Los estándares de emisiones de California, más estrictos que los requerimientos de la EPA, tienen el nombre de LEV. Por otra parte en Europa se utilizan límites dados por las normas de la Unión Europea (UE), conocidas como EURO.

1.6.2.1. Normas Americanas

En Estados Unidos los estándares de emisiones son tratados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA); la misma que ha desarrollado normativas para regular la cantidad de emisiones contaminantes llamadas Tier, cabe recalcar que cada norma es más rigurosa que la anterior [71].

- Tier I: 1994 - 1997
- Tier II: 2004 - 2009
- Tier III: 2017 - 2025

Paralelamente el estado de California ha promulgado normas de emisiones vehiculares que otros estados las han adoptado. Las normas de emisiones de California son establecidas por la California Air Resources Board (CARB) la misma que ha influenciado sobre los requisitos de emisiones de las grandes fábricas automotrices e incluso la Unión Europea (UE) ha tomado en cuenta las políticas de CARB; ya que estas son más estrictas que las Federales EPA.

Los principales pasos regulares en la evolución de las normas de emisión del estado incluyen:

- LEV 1: hasta 2003
- LEV 2: 2004 - 2010
- LEV 3: 2015 - 2025

Dicho conjunto de normas con tendencia a llegar a emisiones nulas, se dividen en subniveles:

- TLEV: emisiones vehiculares muy bajas transitorias
- LEV: emisiones vehiculares bajas
- ULEV: misiones vehiculares ultra bajas

- SULEV: emisiones vehiculares súper ultra bajas
- PZEV: emisiones vehiculares parcial a cero
- ZEV: emisiones vehiculares cero

A continuación en la Tabla 1.11. se detallan los límites máximos permitidos de la norma federal y californiana LEV I, LEV II y LEV III, en masa de sustancia contaminante por unidad de distancia (gramos/milla), se debe notar que con el avance de las normas los límites máximos permitidos expresados en factores de emisión disminuyen cada vez hasta llegar a cero; todo esto bajo el ciclo dinámico de conducción FTP-75 el cual es americano.

Tabla 1. 11. Normas de regulación de emisiones en Estados Unidos para vehículos de pasajeros. Basado en el ciclo FTP 75.

NORMA	50,000 millas / 5 años			100,000 millas / 10 años		
	CO [g/mi]	HC [g/mi]	NOx [g/mi]	CO [g/mi]	HC [g/mi]	NOx [g/mi]
Federal						
US Tier 0 (previo a 1994)	3.400	0.410	1.000	-	-	-
US Tier I	3.400	0.250	0.400	4.200	0.310	0.600
US Tier II	1.700	0.125	0.200	1.700	0.125	0.200
US Tier III	-	-	-	1.000	0.030	-
California LEV I (Fase I)						
Transición (TLEV)	3.400	0.125	0.400	4.200	0.156	0.600
Emisiones bajas (LEV)	3.400	0.075	0.200	4.200	0.090	0.300
Emisiones ultra bajas (ULEV)	1.700	0.040	0.200	2.100	0.055	0.300
Emisiones cero (ZEV)	0	0	0	-	-	-
California LEV II (Fase II)						
Emisiones bajas (LEV)	3.400	0.075	0.050	4.200	0.090	0.070
Emisiones ultra bajas (ULEV)	1.700	0.040	0.050	2.100	0.055	0.070
California LEV III (Fase III)						
Emisiones bajas (LEV)	-	-	-	4.200	0.160	-
Emisiones ultra bajas (ULEV125)	-	-	-	2.100	0.125	-
Emisiones ultra bajas (ULEV70)	-	-	-	1.700	0.070	-
Emisiones ultra bajas (ULEV50)	-	-	-	1.700	0.050	-
Emisiones ultra bajas (SULEV30)	-	-	-	1.000	0.030	-
Emisiones ultra bajas (SULEV20)	-	-	-	1.000	0.020	-

Fuente: [66]

1.6.2.2. Normas Europeas

Las normas europeas fijan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión de los vehículos vendidos en los países miembros de la Unión Europea. Las normas surgen desde la EURO 0 hasta la EURO VI regulando las emisiones de NO_x, HC, PM y CO [72].

- EURO 0: 1998 - 1993

- EURO I: 1993 – 1996
- EURO II: 1996 – 2000
- EURO III: 2000 – 2005
- EURO IV: 2005 – 2009
- EURO V: 2009 – 2014
- EURO VI: 2014

En la Tabla 1.12. se muestra los avances de las normas EURO en función de los años y de los diferentes gases contaminantes en gramos/kilómetro:

Tabla 1. 12. Normas de regulación de emisiones en la Unión Europea para vehículos de pasajeros (<2500 kg). Basado en el Nuevo Ciclo de Manejo (NEDC= ECE15+EUDC).

Norma	CO (g/Km)	HC (g/Km)	HC+NOx (g/Km)	NOx (g/Km)	PM (g/Km)	PN (#/Km)
Euro I (Julio 1992)	2.72	-	0.97	-	-	-
Euro II (Enero 1996)	2.20	-	0.50	-	-	-
Euro III (Enero 2000)	2.30	0.20	-	0.15	-	-
Euro IV (Enero 2005)	1.00	0.10	-	0.08	-	-
Euro V (Septiembre 2009)	1.00	0.10	-	0.06	0.005 (DI)	-
Euro VI (Septiembre 2014)	1.00	0.10	-	0.06	0.005 (DI)	6x10 ¹¹ (DI)

Fuente: [66].

En el año en curso la norma vigente EURO VI se encuentra en la segunda de sus tres etapas EURO 6C, en esta se hace imperativo el cambio del ciclo NEDC al WLTP ya que este último corresponde a los procedimientos de pruebas en vehículos ligeros coordinados a nivel mundial; este ciclo determina los límites de las emisiones contaminantes, así como el consumo de combustible y la autonomía del motor, en el caso de los vehículos eléctricos. Desde la norma EURO 6C no solo es importante determinar el tamaño del material particulado sino el número de partículas emitidas es por esta razón que los nuevos vehículos cuentan con un filtro de partículas (DFP) [73], el cual las atrapa y evita su curso a través del tubo de escape. Todo esto es importante para la inserción de la norma EURO 7 en los años posteriores continuando así con los controles rigurosos de las emisiones vehiculares.

1.6.2.3. Normas Nacionales

Los Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) fija los límites de emisiones ya que este es un organismo oficial de la República del Ecuador para la normalización, certificación y metrología.

El INEN mediante la norma NTE INEN 2207:2002 [74] establece los límites permitidos de emisiones contaminantes, expresados en factores de emisión, producidas por

fuentes móviles terrestres combustionados por diésel, dicha norma tiene sus fundamentos en regulaciones tanto americanas como europeas pero adaptadas a la política y realidad nacional tanto de los combustibles como de las tecnologías automotrices de los mismo a través de los años.

A continuación, en la Tabla 1.13. y 1.14., se muestran los límites máximos de emisiones bajo pruebas dinámicas tanto en ciclos americanos como europeos, respectivamente; haciendo énfasis en los factores de emisión de HC, CO y NO_x expresados en gramos por kilómetro recorrido.

Tabla 1. 13. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diésel, bajo prueba dinámica en ciclos americanos, a partir del año modelo 2000.

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso del vehículo cargado kg	CO g/km	HC g/km	NO _x g/km	Partículas g/km	Ciclos de prueba
Vehículos Livianos	Todos	Todos	2.1	0.25	0.62	0.12	FTP-75
Vehículos Medianos	≤ 3860	≤ 1700	6.2	0.5	0.75	0.16	
		>1700 ≤ 3860	6.2	0.5	1.1	0.28	
Vehículos Pesados*	> 3860	Todos	15.5	1.3	5	0.10**	Transiente pesado

* en g/bHP-h (gramos / brake Horse Power-hora)
** para buses urbanos el valor es de 0.07 g/bHP-h

Fuente: [48]

Tabla 1. 14. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diésel, bajo prueba dinámica en ciclos europeos, a partir del año modelo 2000.

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	Peso de referencia kg	CO g/km	HC g/km	NO _x g/km	Partículas g/km	Ciclos de prueba
M1 ⁽¹⁾	≤ 3500	Todos	2.72	0.97 ⁽⁴⁾		0.14	ECE - 15 + EUDC
M1 ⁽²⁾ , N1		≤ 1250	2.72	0.97 ⁽⁴⁾		0.14	
		>1250 ≤ 1700	5.17	1.4 ⁽⁴⁾		0.19	
		>1700	6.9	1.7 ⁽⁴⁾		0.25	
N2, N3, M2, M3 ⁽³⁾	> 3500	Todos	4	1.1	7	0.10**	ECE - 49

⁽¹⁾ Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor y con un peso bruto del vehículo menor o igual a 2.5 toneladas.
⁽²⁾ Vehículos que transportan más de 5 pasajeros más el conductor o cuyo peso bruto del vehículo exceda de 2.5 toneladas.
⁽³⁾ Unidades g/kWh ⁽⁴⁾ HC + NO_x

Fuente: [48]

De las Tablas anteriores se puede notar los límites existentes de los factores de emisión bajo el ciclo dinámico americano FTP-75 tanto para vehículos livianos, medianos y

pesados y del ciclo dinámico europeo ECE-15+EUDC tanto para vehículos mayores y menores a los 3500kg de peso en bruto.

Además esta norma indica el límite máximo de opacidad de emisiones para fuentes móviles con motor diésel bajo la prueba de aceleración libre; la misma que establece una opacidad menor al 60% para motores anteriores al año modelo 1999 y un límite máximo de 50% de opacidad para motores posteriores al año modelo 2000.

1.6.3. Control de Emisiones

El control de emisiones o tecnologías de emisiones se enfoca en la inspección y reducción de emisiones contaminantes desde el proceso de la combustión hasta su salida por el tubo de escape. Se clasifican a continuación, no obstante no se profundizan en los mismos ya que no son objetivos fundamentales del presente estudio.

1.6.3.1. Control de las emisiones del sistema de escape

El control de las emisiones del sistema de escape puede estimarse por [41]:

Incremento en la eficiencia del motor

- Sistemas de inyección
- Unidad electrónica de control

Incremento en la eficiencia del vehículo

- Disminución de peso en el diseño
- Mejor aerodinámica
- Mejora en los sistemas de transmisión

Incremento en la eficiencia de manejo:

- Mejores técnicas de conducción
- Mejoras de circulación en tráfico
- Reducción del número de arranques en condiciones frías

Limpieza de las emisiones producidas

- Inyección de aire
- Reciclaje y recirculación de los gases de escape
- Convertidores catalíticos

Es importante recalcar que el control de emisiones contaminantes de fuentes móviles viene de la mano tanto de mejores tecnologías de sistemas pre y post combustión, como de mejores combustibles y por ende de normativas vigentes que las regule.

En el siguiente capítulo se detalla la metodología a desarrollar para evaluar las emisiones de gases de escape de un motor encendido por compresión utilizando mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio; partiendo desde la elaboración del biodiésel de aceite crudo de palma mediante transesterificación supercrítica, seguido de la caracterización de cada una de las mezclas del combustible con el biocombustible y el aditivo, y finalmente el protocolo de pruebas realizado para determinar la concentración de emisiones contaminantes como son NO_x [ppm], HC [ppm], PM₁₀ [mg/m³], CO [%V], O₂ [%V] y CO₂ [%V], seguido de la determinación de sus factores de emisión NO_x, CO y HC expresados en [g/km] empleando el modelo matemático simplificado de la combustión, y de esta forma determinar la mejor mezcla, es decir, la que genera los menores niveles de contaminación tanto en concentración como en factores de emisión, bajo el ciclo IM-240 en la ciudad de Quito.

2. METODOLOGÍA

La realización de este trabajo de investigación inicia con la elaboración del biodiésel de aceite crudo de palma bajo condiciones supercríticas, seguido de la caracterización físico-química tanto del diésel como de sus mezclas con biodiésel y óxido de cerio, continua con la evaluación de los gases de escape del vehículo de prueba tanto en concentración volumétrica como en factores de emisión bajo el ciclo IM-240, en un dinamómetro de chasis.

2.1. Elaboración de biodiésel

De acuerdo a varias investigaciones llevadas a cabo en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) de la Facultad de Ingeniería Química establece que las condiciones óptimas para obtener biodiésel supercrítico son:

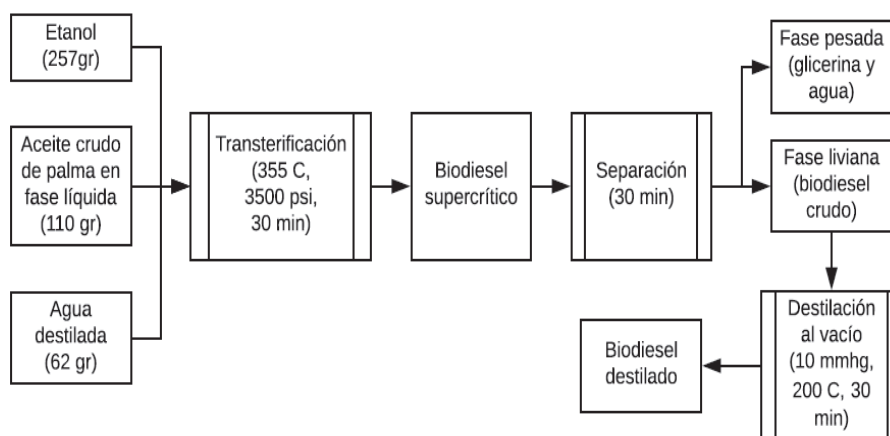


Figura 2. 1. Proceso de elaboración de biodiésel por transesterificación supercrítica.

(Fuente: Propia)

Con el proceso mostrado en la Figura 2.1. se garantiza la obtención de biodiésel 100% puro bajo condiciones supercríticas y listo para su inserción en un motor de combustión interna. La reacción de transesterificación es la siguiente:



Ec. 2.1.

De la ecuación anterior se debe notar que la obtención de biodiésel tuvo lugar desde un ácido graso, triglicérido, reaccionando con agua y etanol lo cual genera la formación de glicerina y ésteres etílicos los cuales son conocidos como biodiésel. En el siguiente apartado se muestran los equipos utilizados para la elaboración del biodiesel con sus fichas técnicas y principales características.

2.1.1. Equipos

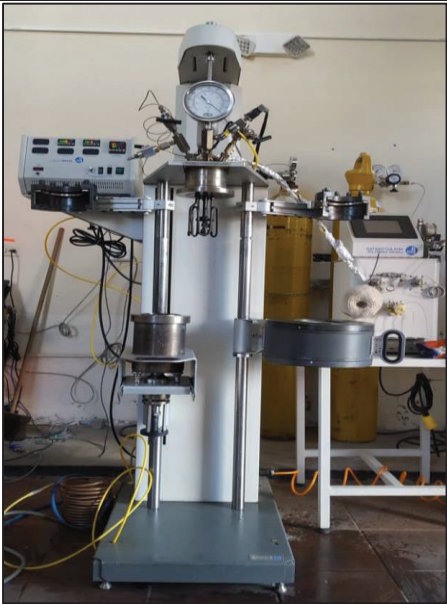
Los equipos empleados en la elaboración y preparación de biodiésel a base de aceite crudo de palma se encuentran en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) de la Escuela Politécnica Nacional y se muestran a continuación:

- Reactor PARR 4848
- Destilador al vacío B/R INSTRUMENT CORPORATION Full Automatic ASTM D1160
- Agitador Electromagnético NEVATION

2.1.1.1. Reactor PARR 4848

Este equipo permite llevar a cabo la transesterificación mediante el método supercrítico, una fotografía del equipo y su ficha técnica se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Reactor.

	Marca:	PARR
	Modelo:	4848
	Tipo:	Columna
	Potencia:	2800W
	Temperatura Máxima:	500°C
	Presión máxima:	5000psi
	Volumen:	1000ml aprox.
	Suministro de energía:	230V, AC

Fuente: [75]

Sus componentes principales son:


- Sistema neumático para colocación de horno y soportes.
- Sistema de enfriamiento con agua
- Sistema de extracción mediante nitrógeno
- Sistema de control
- Horno eléctrico
- Agitador de aletas
- Controlador
- Muestreador

- Software SpecView
- Computadora portátil

2.1.1.2. Destilador al Vacío B/R INSTRUMENT CORPORATION Full Automatic ASTM D1160

Este equipo permite extraer las impurezas existentes en un fluido al someterlo a una presión y temperatura predeterminadas, la fotografía del equipo, la interfaz del software y su ficha técnica se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Destilador al vacío.

	Marca:	B/R INSTRUMENT CORPORATION
	Modelo:	Full Automatic ASTM D1160
	Volumen:	500ml
	Potencia:	10A
	Alimentación:	220V, AC
	Temperatura de destilación:	30 a 100°C
	Temperatura de la trampa de enfriamiento:	-60°C

Fuente: [76]

Los principales componentes del equipo de destilación al vacío son los siguientes:


- Matraz de circulación
- Baño de circulación
- Trampa de enfriamiento
- Software BR D1160

2.1.1.3. Agitador Electromagnético NEVATION

Equipo utilizado para homogenizar una mezcla determinada y precalentarla de ser necesario; sus revoluciones, temperatura y tiempo se los puede controlar digitalmente. De acuerdo a varias investigaciones la temperatura óptima para precalentar el biodiésel es a 40°C con una velocidad de 500rpm en un tiempo aproximado de 30 minutos [77].

A continuación en la Tabla 2.3. se muestra la fotografía del agitador electromagnético y su ficha técnica:

Tabla 2. 3. Agitador magnético.

	Marca:	NEVATION
	Modelo:	i Stir HP 550
	Capacidad:	20 litros
	Temperatura:	Máx. 550°C.
	Tipo de motor:	BLDC
	Peso:	5,4kg
	Velocidad de agitación:	200 a 2200rpm
	Tiempo máximo:	999min
	Dimensiones:	220mm x 330mm x 115mm

Fuente: [78]

2.2. Caracterización de las mezclas

La caracterización de un combustible o de una mezcla de combustible proporciona información tanto de las propiedades físicas como químicas, se la realiza con las respectivas normas ya sea nacionales o sus equivalentes en normas internacionales.

En el presente trabajo se realizará la caracterización de cuatro mezclas de combustible, biocombustible y aditivo: Diésel (D), Biodiésel supercrítico 10% + Diésel 90% (B10), Óxido de Cerio + Diésel (DC) y Biodiésel supercrítico 10% + Diésel 90% + Óxido de Cerio (B10DC); ver Figura 2.2.

La caracterización se llevará a cabo bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012 “Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos” [28]. En la Tabla 2.4. se muestran las pruebas realizadas a cada una de las muestras.

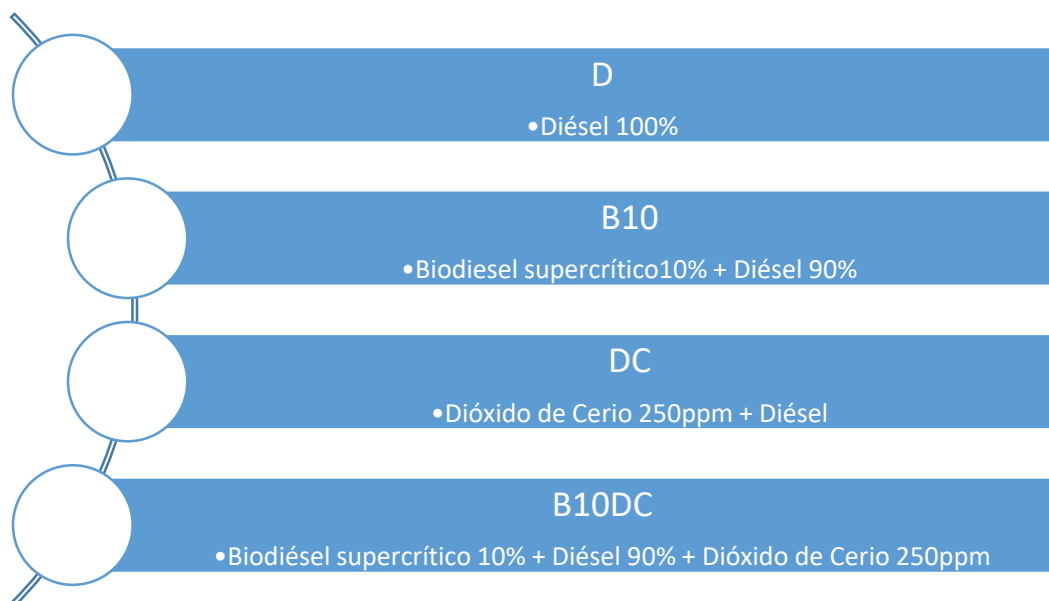


Figura 2. 2. Mezclas caracterizadas.

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 4. Propiedades del combustible con su respectiva norma.

Propiedades Físicas y Químicas	Norma
Densidad Relativa 15.6 ⁰ C	ASTM D-1298
Viscosidad Cinemática a 40 ⁰ C	INEN 810 1R
Destilación	INEN 926
Contenido de agua y sedimentos	INEN 1494
Contenido de Azufre	INEN 1490
Contenido de Cenizas	INEN 1492
Poder Calorífico	ASTM D-240
Punto de Inflamación	INEN 1493 2R
Corrosión a la lámina de cobre	INEN 927

Fuente: [28]

Los resultados de la caracterización de cada una de las mezclas empleadas en este estudio estuvieron a cargo del LACBAL cuyos resultados se muestran en el tercer capítulo.

Una vez obtenido el combustible, biocombustible y aditivo, en sus respectivas mezclas, y realizadas las caracterizaciones se puede avanzar a la inserción de las mezclas de combustibles, biocombustibles y/o aditivos en el vehículo de prueba con el fin de medir sus emisiones de gases de escape.

2.3. Medición de emisiones contaminantes en concentración

La medición de emisiones contaminantes en concentración se llevó a cabo en un dinamómetro de chasis en el cual se posicionó el vehículo, en óptimas condiciones mecánicas y de operación, para luego someterlo a un ciclo de conducción mientras se toman datos de sus emisiones contaminantes con ayuda de equipos medidores de gases. Los gases evaluados fueron los siguientes CO [%V], CO₂ [%V], O₂ [%V], HC [ppm], NO_x [ppm] y PM₁₀ [mg/m³] tanto para el diésel de origen fósil, como para las mezclas de diésel + biodiésel, diésel + óxido de cerio y diésel + biodiésel + óxido de cerio.

2.3.1. Equipos

Los equipos utilizados para la medición de emisiones contaminantes con los que cuenta en Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación de Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV) de la Escuela Politécnica Nacional son los siguientes:

- Dinamómetro de chasis LPS 3000
- Analizador de Gases On-Board Axion Go R/S TM
- Analizador de Gases Combinado MET 6.3
- Medidor de Partículas MPM 4M
- Caja de Interfaces
- Ventilador
- Medidor de Consumo de Combustible
- Sistema de extracción de gases
- Vehículo de prueba
- Módulo de temperaturas de gases de escape

2.3.1.1. Dinamómetro de chasis LPS 3000

Este equipo permite realizar pruebas como: simulación de carga, ensayo de torque y potencia, prueba Lug Down, control de tacómetro y simular un contorno de velocidad en función del tiempo como ciclos de conducción. En la Tabla 2.5. se muestra una imagen del dinamómetro y sus especificaciones técnicas.

Tabla 2. 5. Especificaciones técnicas del dinamómetro de chasis.



Modelo:	LPS 3000
Tipo de Rodillos:	R 100
Revoluciones del Motor:	0 - 10000RPM
Precisión:	±2% (sobre el valor de la medición)
Fuerza de Tracción:	0 - 15kN
Carga Máxima por Eje:	15Ton
Velocidad:	0 – 200km/h
Alimentación:	400V (50Hz)
Potencia de Ruedas:	0 – 400kW
Diámetro Mínimo de Rueda	12pulg

Fuente: [6]

2.3.1.2. Analizador de Gases On-Board Axion Go R/S TM

Este equipo permite medir las concentraciones de CO, HC, NO_x, CO₂, O₂ y HC; tanto en pruebas dinámicas como en pruebas estáticas a través de una sonda previamente colocada en el tubo de escape. En la Tabla 2.6. se muestra una imagen del analizador y sus especificaciones técnicas.

Tabla 2. 6. Especificaciones técnicas del Analizador de Gases.



Marca:		Global Axion Go	
Modelo:		On Board	
Índice de Flujo:		5 lt/min	
Tensión de Alimentación:		12 – 24V, DC / 5 – 8A	
Principio de Medición (HC, CO y CO₂)		Espectrometría de infrarrojo	
Principio de Medición (NO_x y O₂)		Detección Electroquímica	
Gas	Rango de medición	Precisión	Resolución
CO	0.00 – 25.00%	±0.02% abs. or ±3% rel.	0.01 Vol. %
O₂	0.00 – 25.00 %	±0.1% abs. or ±3% rel.	0.01 Vol. %
NO_x	0-4000 ppm	±25ppm abs. or ±4% rel.	1 ppm
CO₂	0.00 – 16.00 %	±0.3% abs. or ±3% rel.	0.01 Vol. %
HC	0 - 4000 ppm	±8ppm abs. or ±3% rel.	1 ppm

Fuente: [79]

2.3.1.3. Analizador de Gases Combinado MET 6.3

Este analizador se utilizó para medir las concentraciones de HC, CO, NO_x, CO, CO₂, O₂ y PM₁₀ durante el ciclo de conducción, es combinado porque es compatible para medir emisiones tanto de motores combustionados por gasolina, diésel y gas licuado de petróleo. En la Tabla 2.7. se muestra una imagen del equipo y sus especificaciones técnicas.

Tabla 2. 7. Especificaciones técnicas del analizador de gases.



Marca:		MAHA
Modelo:		MET 6.3
Alimentación de Corriente:		10 – 30V, DC
Alimentación entrada del equipo	Alimentación de corriente	10 – 30V, DC
	Consumo de energía	60W
Fuente de alimentación de mesa	Tensión	90 – 265V, DC
	Potencia	60W
Gas	Rango de medición	Precisión
CO	0.00 % - 10.00 %	± 0,02 % abs. or ±3 % rel.
O₂	0.00 – 25.00 %	± 0,02 % abs. or ±1 % rel.
NO_x	0 - 1 000ppm	±25ppm abs. or ±4% rel.
CO₂	0.00 – 16.00 %	± 0,3 % abs. or ±3 % rel.
HC	0 - 2 000ppm	-
PM	1 - 1100mg/m ³	-

Fuente: [80]

2.3.1.4. Medidor de Partículas MPM 4M

Este equipo se utilizó para medir las concentraciones del material particulado en cada una de las mezclas ensayadas en el motor, cuenta con una sonda y una computadora portátil con su software de adquisición de datos. Es un equipo compacto y manual, a continuación, en la Tabla 2.8. se muestra una imagen del medidor de partículas así como sus especificaciones técnicas.

Tabla 2. 8. Especificaciones técnicas del medidor de partículas.



Marca:	MAHA
Modelo:	MPM 4M
Principio de Medición:	Dispersión de luz láser
Software:	MPM View
Alimentación:	12V, DC
Potencia Media Absorbida:	25W
Rango de Medición:	0,1 - 400mg/m ³
Dimensiones:	550 x 245 x 240mm

Fuente: [81]

2.3.1.5. Caja de Interfaces

Este equipo se utiliza para registrar tanto el número de revoluciones como la temperatura de aceite del motor, empleando un sensor en forma de ballesta y una pinza electromagnética los cuales se colocan en el medidor del aceite y en el polo positivo de la batería del vehículo, respectivamente, antes de dar inicio a la prueba; este proceso de registro se realiza mediante dos módulos como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2. 3. Cajas de Interfaces, módulos.

(Fuente: Propia)

Los módulos interactúan con el dinamómetro y muestran sus valores en tiempo real durante el desarrollo del ciclo con el fin que el usuario se encuentre informado de la temperatura del aceite del motor y de las revoluciones del mismo.

2.3.1.6. Ventilador

Este equipo es el encargado de generar una ventilación forzada para la debida refrigeración del motor cuando este sea colocado sobre el dinamómetro y sometido a un ciclo, es de vital importancia ya que los sistemas modernos de regulación del motor disponen de dispositivos de control que reducen la potencia del motor si las temperaturas de aspiración son demasiadas altas. En la Figura 2.4. se muestra el ventilador utilizado en el presente trabajo.



Figura 2. 4. Ventilador.

(Fuente: Propia)

2.3.1.7. Medidor de Consumo de Combustible

Este depósito de combustible externo al sistema de inyección es necesario para determinar el consumo de combustible del motor mediante diferencia volumétrica, ver Figura 2.5.



Figura 2. 5. Tanque externo, medidor de consumo de combustible.

(Fuente: Propia)

Consta de una salida de combustible al motor ubicada en la parte inferior y una entrada de retorno de combustible en la parte superior del mismo, y además facilita el cambio de las mezclas de combustibles.

2.3.1.8. Sistema de extracción de gases

El sistema de ductos flexibles y fijos de extracción de gases con los cuales cuenta el CCICEV permite evacuar los gases de combustión del motor, desde el final del tubo de escape hacia el exterior, minimizando el riesgo de que el personal técnico aspire en gran cantidad dichos gases de escape. En la Figura 2.6. se muestra el sistema de extracción de gases en su totalidad.




Figura 2. 6. Sistema de extracción de gases.

- 1) Ducto móvil y toma de gases de escape.
 - 2) Ductos fijos
 - 3) Extractor de gases de escape al exterior
- (Fuente: Propia)

2.3.1.9. Vehículo de Prueba

Al igual que los equipos mencionados anteriormente este vehículo de prueba, camioneta Chevrolet Luv D-Max 4x2 Turbo Diésel, es de propiedad del CCICEV, en la Tabla 2.9. se muestra una imagen de la misma y las especificaciones del fabricante.

Tabla 2. 9. Especificaciones técnicas del vehículo.

			
Datos Generales del Vehículo			
Marca:	Chevrolet	Placa:	PEI 7230
Modelo:	Luv D-Max 3,0L Diésel CD TM 4x2	N° Chasis	8LBETF3F1B0052918
Datos del Motor			
Posición del motor:	Frontal-Transversal	N° Motor:	4JH1883668
Cilindros:	4 en línea	Relación de Compresión:	18,3:1
Potencia Máx.:	130HP @ 3600RPM	Torque Máx.:	280 Nm @ 2000RPM
Cilindrada:	3000cm ³	Año:	2011
Tipo:	N 1	Categoría:	Camioneta doble cabina

Fuente: Propia

2.3.1.10. Módulo de temperaturas de gases de escape

Este equipo tiene como función adquirir los valores numéricos de la temperatura de los gases de escape, se lo coloca en el múltiple de escape del motor que se encuentra a un costado de la culata; se encuentra constituido por:

Tabla 2. 10. Sistema de adquisición de datos de temperatura de gases de escape.

	Instrumentos:	Placa Arduino Mega
		Termocupla tipo J
		Cables de conexión macho-macho
Softwares:	Arduino	
	LabView	
	Microsoft Excel	

Fuente: Propia

2.3.2. Protocolo IM-240

Por medio de las pruebas de ciclo de conducción IM-240 se busca determinar el comportamiento de las emisiones contaminantes en el vehículo de prueba: Chevrolet Luv D-Max 4x2 Turbo Diésel. Para determinar los valores de contaminación promedio de cada mezcla se procedió a realizar 5 repeticiones del ciclo de conducción para cada una de las mezclas: diésel (D), diésel + óxido de cerio (DC), diésel + biodiésel supercrítico 10% (B10) y diésel + biodiésel supercrítico 10% + óxido de cerio (B10DC). En el esquema de la Figura 2.7. se muestra el protocolo de ensayo realizado.

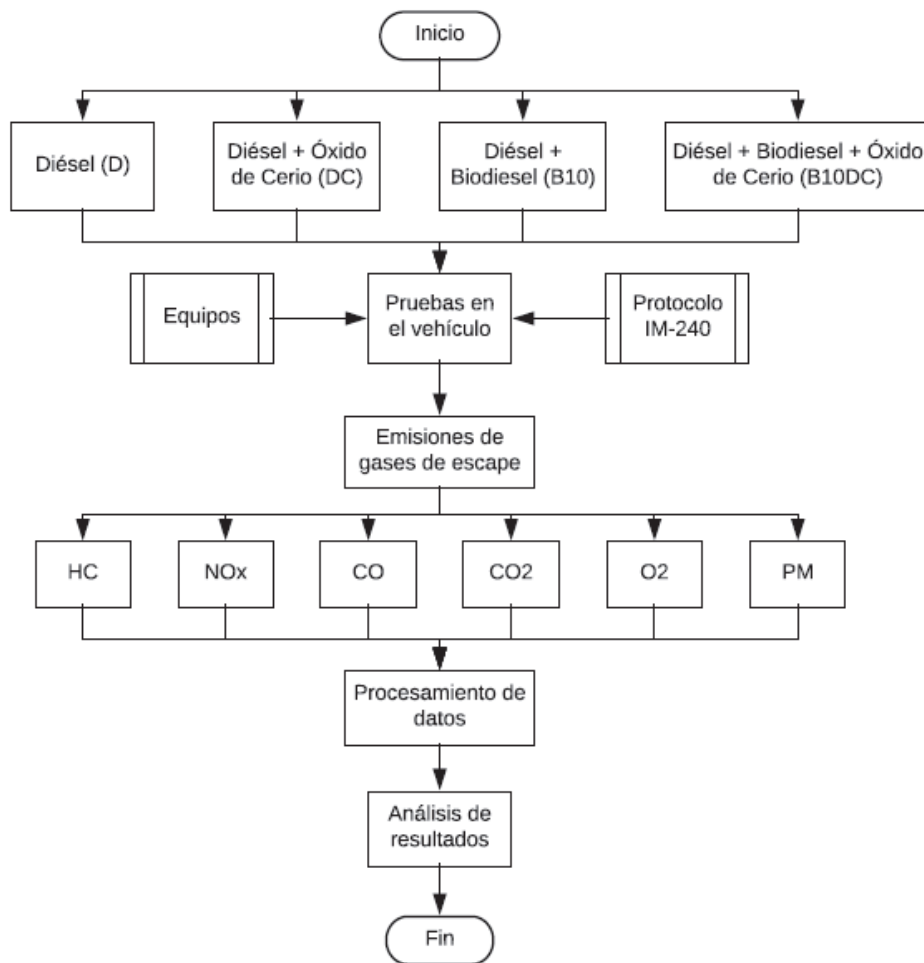


Figura 2. 7. Esquema de pruebas.

(Fuente: Propia)

El procedimiento de las pruebas en el siguiente:

1. Preparación del combustible y mezclas

- Adquirir el combustible, diésel, necesario para realizar las mezclas, el mismo que debe ser de una misma estación de servicio y dispensador.

- Elaborar el biocombustible de aceite crudo de palma mediante transesterificación supercrítica.
- Adquirir el aditivo, óxido de cerio de 250ppm, necesario para realizar las mezclas.
- La medición de la cantidad de volumen del diésel, biodiésel y aditivo se debe realizar en probetas calibradas.
- La mezcla se realizó en un matraz de vidrio en las cantidades adecuadas, se utilizó el agitador magnético para precalentar y homogenizar la mezcla de diésel con biodiésel a 70°C y 500rpm en un tiempo de 30 minutos.
- Se preparó 6 litros de cada mezcla; de los cuales 1 litro es destinado para su caracterización y los 5 litros restantes son insertados como combustible en el motor.

En la Figura 2.8. se muestran las 4 mezclas ensayadas, D, DC, B10 y B10DC, respectivamente.



Figura 2. 8. Probeta de medición con cada mezcla de combustible.

(Fuente: Propia)

2. Posicionamiento del vehículo

- Verificar las condiciones mecánicas del vehículo.
- Comprobar la no existencia de fugas en el sistema de escape del motor de prueba.
- Posicionar las ruedas motrices del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro.
- Descender los rodillos y verificar que la distancia entre los neumáticos y rodillos sea compartida, equidistante.
- Fijar el vehículo al dinamómetro por medio de correas de tensión, las cuales se fijan en el eje posterior del automotor con el fin de asegurarlo y garantizar la fijación del neumático del vehículo con los rodillos del dinamómetro, como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2. 9. Posicionamiento y fijación del vehículo de prueba sobre el dinamómetro, vista frontal y posterior.

(Fuente: Propia)

3. Instalación de equipos

- Instalar los 3 analizadores de gases ON BOARD AXION GO, MET 6.3 y MPM 4M.

Es decir, en el motor colocar los sensores de temperatura y medidor de revoluciones, y al final del tubo de escape posicionar cada una de las sondas de cada equipo analizador de gases, como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2. 10. Instalación de los analizadores de gases, vista lateral y posterior.

- 1) Met 6.3 y computadores portátiles del equipo
 - 2) Analizador On Board y MPM 4M
 - 3) Sondas fijas al interior del tubo de escape
- (Fuente: Propia)

- Encender las computadoras de cada analizador y verificar su correcta funcionalidad y adquisición de datos.

- Colocar la toma del extractor de gases a la salida del tubo de escape y encenderlo, como se indica en la Figura 2.11.



Figura 2. 11. Posicionamiento del extractor de gases.

(Fuente: Propia)

- Posicionar el ventilador o siroco de aire refrigerante delante del radiador del vehículo a una distancia aproximada de 1.5m. Ver Figura 2.12.



Figura 2. 12. Posicionamiento del ventilador.

(Fuente: Propia)

- Realizar la conexión del tanque externo de combustible por medio de dos mangueras, una es el ingreso a la bomba principal de combustible del motor y la otra es la manguera de retorno.
- Colocar la mezcla, 5 litros, en el tanque externo y abrir la válvula de paso. Es necesario proceder a purgar el sistema de combustible para eliminar la presencia de aire tanto en la bomba como en la manguera de ingreso de combustible, esto se puede ver en la Figura 2.13.

- Verificar que no existan fugas de combustible.
- Monitorear las condiciones ambientales con ayuda de la caja de interfaces.



Figura 2. 13. Instalación del depósito externo de combustible.

(Fuente: Propia)

4. Ciclo de conducción

- Encender el motor, mantenerlo en ralentí, durante un tiempo medio de 15 a 30 minutos, hasta que el mismo alcance su temperatura óptima de funcionamiento, 94°C.
- Encender la computadora que controla al dinamómetro, ingresar los datos del fabricante del automotor. Esto se muestra en la Figura 2.14.

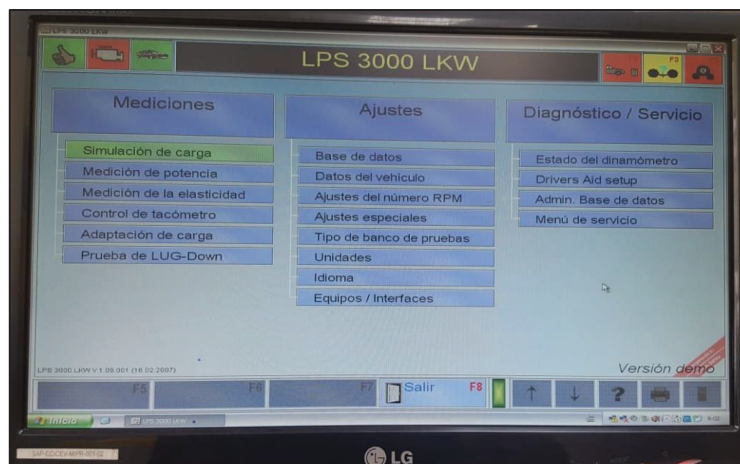


Figura 2. 14. Interfaz del dinamómetro de chasis.

(Fuente: Propia)

- Seleccionar y cargar el ciclo de conducción IM-240 en el equipo LPS 3000. Ver Figura 2.15.



Figura 2. 15. Interfaz del ciclo de conducción IM-240.

(Fuente: Propia)

- Verificar la temperatura del motor, que alcance los 94^oC, y dar inicio al ciclo y medición de los gases de escape en cada uno de los analizadores previamente instalados.

5. Registro de datos

- En el analizador de gases On Board Axion Go los datos de las concentraciones de gases se muestran a través de su interfaz y al final se genera una hoja Excel de los mismos. Ver Figura 2.16.

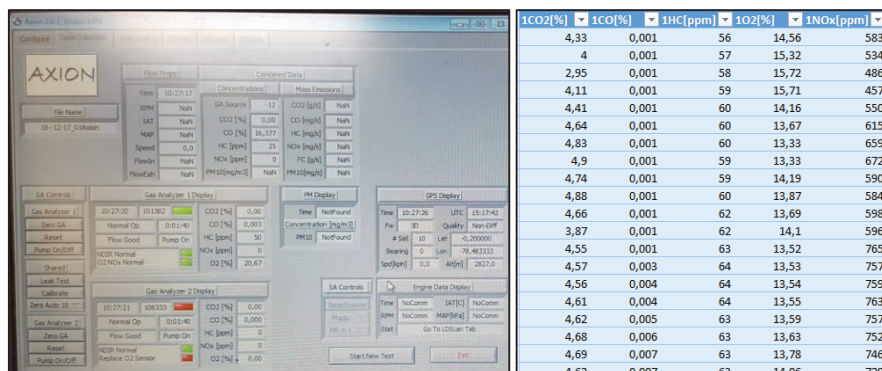


Figura 2. 16. Interfaz de la adquisición de datos del equipo On Board Axion Go.

(Fuente: Propia)

- En el analizador de gases combinado MET 6.3 los datos de las concentraciones de gases se muestran a través de su pantalla digital o mediante la interfaz del software y al final de cada prueba genera una hoja de cálculo Excel con los respectivos datos, así como se muestra en la Figura 2.17.

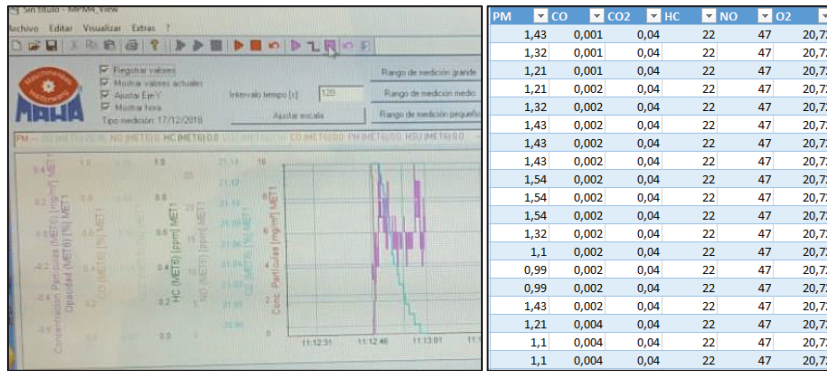


Figura 2. 17. Interfaz de la adquisición de datos del equipo MET 6.3.

(Fuente: Propia)

- En el analizador de material particulado MPM 4M ingresan los gases de escape y mediante el software se adquieren los datos, dicha interfaz del software se muestral en la Figura 2.18.

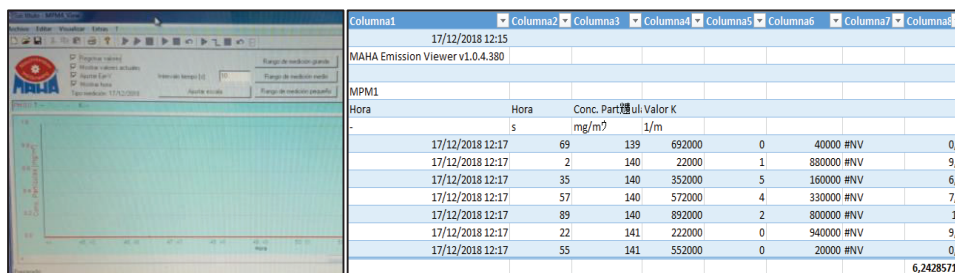


Figura 2. 18. Interfaz de la adquisición de datos del equipo MPM 4M.

(Fuente: Propia)

Una vez tomado los datos se procedió a un tratamiento mediante hojas de cálculo, en las cuales se graficó cada prueba y comparó con las demás y con otros trabajos de otros autores.

Consideraciones:

- Para lograr mediciones homogéneas se debe evitar salidas bruscas al inicio del ciclo de conducción.
- El conductor debe ser el mismo en todas las pruebas.
- Al completar cada ciclo de conducción se debe detener el proceso de medición en cada analizador y guardar los datos de registro.
- El final de cada ciclo o prueba termina cuando los rodillos del dinamómetro paren totalmente y se procede a apagar el vehículo de prueba.
- Las pruebas se deben realizar sin la presencia de lluvia.

2.4. Cálculo de factores de emisión

Una vez procesados los datos de los analizadores se obtiene la medida de cada uno de los gases en concentración volumétrica, es decir se obtiene la concentración promedio de cada gas y mediante el modelo matemático para el cálculo de factores de emisión se procedió a calcularlos. Este proceso se puede observar a continuación, Figura 2.19.

Para el cálculo de los factores de emisión se necesita la caracterización de cada una de las mezclas ya que su fórmula contempla los siguientes parámetros: densidad y peso molecular, y por otra parte se debe tener el dato del consumo de combustible. Los factores de emisión HC, NO_x y CO se encuentran expresados en cantidad de masa sobre distancia recorrida, es decir, gramos por kilómetro g/km.

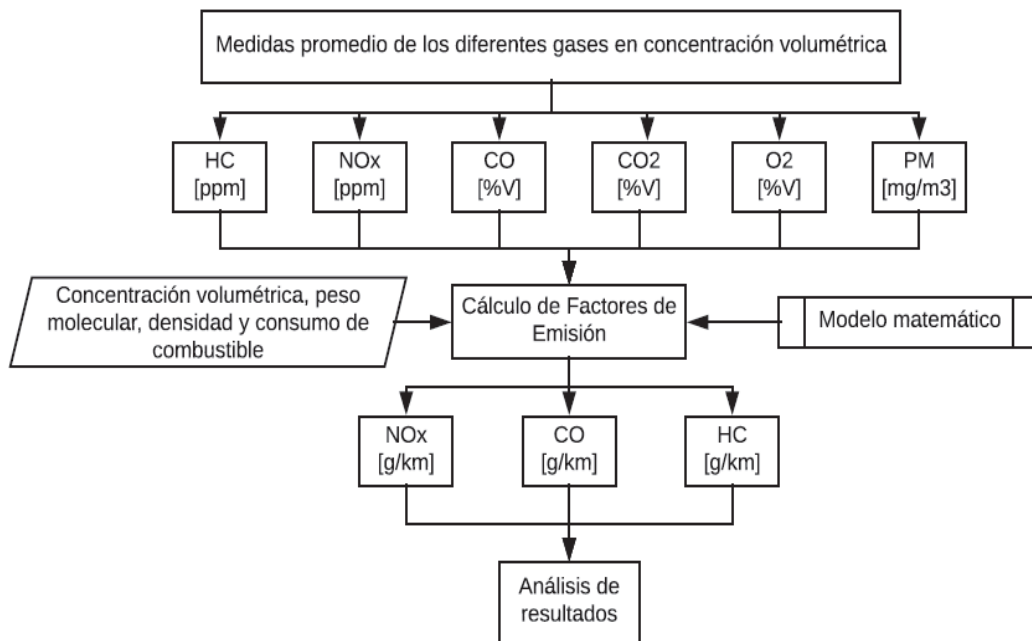


Figura 2. 19. Proceso para la obtención de los factores de emisión de cada mezcla.

(Fuente: Propia)

Entonces una vez obtenidos los factores de emisión de cada mezcla (D, B10, DC y B10DC) se procedió a determinar el combustible que emita la menor cantidad de gases de escape expresado en gramos por kilómetro.

Los resultados de la caracterización, concentración de gases de escape y factores de emisión se muestran en el tercer capítulo, en el cual se discute los resultados obtenidos analizando las diferencias y similitudes existentes entre el comportamiento de cada mezcla de combustible, biocombustible y aditivo ensayados en el vehículo de prueba sometido al ciclo de conducción IM-240.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la caracterización de cada una de las mezclas: diésel (D), diésel + óxido de cerio (DC), diésel + biodiésel supercrítico 10% (B10) y diésel + biodiésel supercrítico 10% + óxido de cerio de 250ppm (B10DC), además las medidas promedio de la concentración de gases de escape CO, CO₂, O₂, HC, NO_x y PM₁₀ y finalmente los factores de emisión de CO, NO_x y HC bajo el ciclo de conducción IM-240.

3.1. Resultados

3.1.1. Caracterización de las mezclas

Las propiedades químicas (peso molecular, punto de inflamación, poder calorífico, contenido de azufre, corrosión a la lámina de cobre e índice de acidez) y físicas (densidad, índice de cetano, agua y sedimentos, contenido de cenizas, contenido de carbón y viscosidad) de cada una de las muestras caracterizadas en el LACBAL se muestran a continuación, Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Resultados de las propiedades físicas de cada mezcla de combustible.

Propiedad	Unidad	D	DC	B10	B10DC
Punto de inflamación	°C	68	75	71	77
Contenido de azufre	mg/kg	92,05	151,9	81,4	136,7
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	1A	1A	1A	1A
Poder calorífico	MJ/kg	38,80	38,80	38,00	38,67
Densidad	kg/m ³	835	835	839	839
Agua y sedimentos	%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	3,27	4,05	3,53	4,05
Contenido de cenizas	%	0,058	0,042	0,041	0,084

Fuente: LACBAL.

3.1.1.1. Punto de Inflamación

En la Figura 3.1. se muestra la variación del punto de inflamación cuando se realiza las mezclas al diésel con biodiésel supercrítico y el óxido de cerio, la misma que presenta una tendencia creciente en todas las mezclas del presente estudio D, DC, B10 y B10DC.

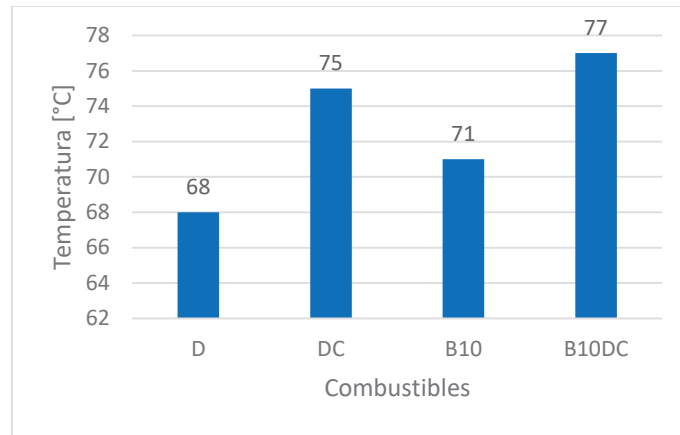


Figura 3. 1. Variación del Punto de Inflamación.

(Fuente: Propia)

Con respecto al punto de inflamación del diésel (D) se puede observar que la mezclas de diésel con óxido de cerio de 250ppm (DC), diésel con 10% de biodiésel supercrítico (B10) y diésel con óxido de cerio de 250ppm más 10% de biodiésel supercrítico (B10DC) presentan un incremento del 10.29%, 4.41% y 13.24%, respectivamente.

Los trabajos de investigación sostienen el incremento del punto de inflamación de mezclas de diésel con biodiésel de aceite crudo de palma [19], [40], [41], [42], [82] al igual que el incremento del punto de inflamación del diésel con óxido de cerio como aditivo [49], [83], [84].

3.1.1.2. Contenido de Azufre

Los valores del contenido de azufre disminuyen cuando se mezcla el diésel con biodiésel; mientras que el contenido de azufre del diésel con el aditivo aumenta, como se puede observar en la Figura 3.2.

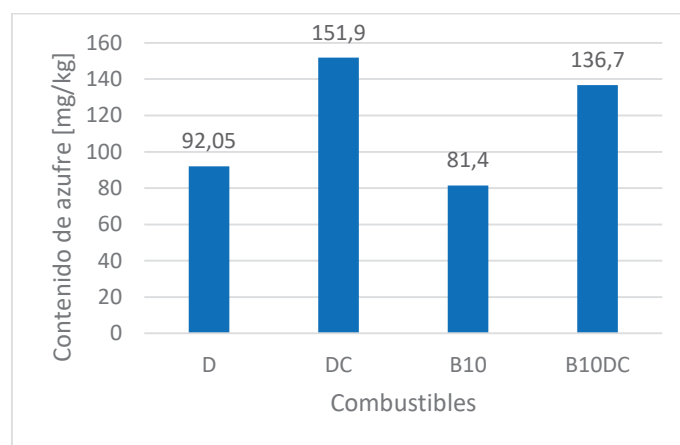


Figura 3. 2. Contenido de azufre de las mezclas ensayadas.

(Fuente: Propia)

Se puede notar con respecto al combustible D que la mezcla DC presenta un incremento del 65.01%, la mezcla B10 presenta una disminución del 11.57% y la mezcla B10DC presenta un incremento del 48.51% del contenido de azufre.

La investigación [44] presenta una disminución del contenido de azufre en mezclas de biodiésel de aceite de palma con diésel de origen fósil; esto se debe a que el biodiésel de palma es de origen vegetal y no fósil como el diésel convencional que contiene azufre en su composición.

3.1.1.3. Poder Calórico

En la Figura 3.3. se muestra la variación del poder calorífico que presenta cada una de las muestras: D, DC, B10 y B10DC. Se puede notar que el poder calorífico disminuye cuando se mezcla el diésel con el biodiésel mientras que el aditivo, óxido de cerio, con diésel no presenta variación.

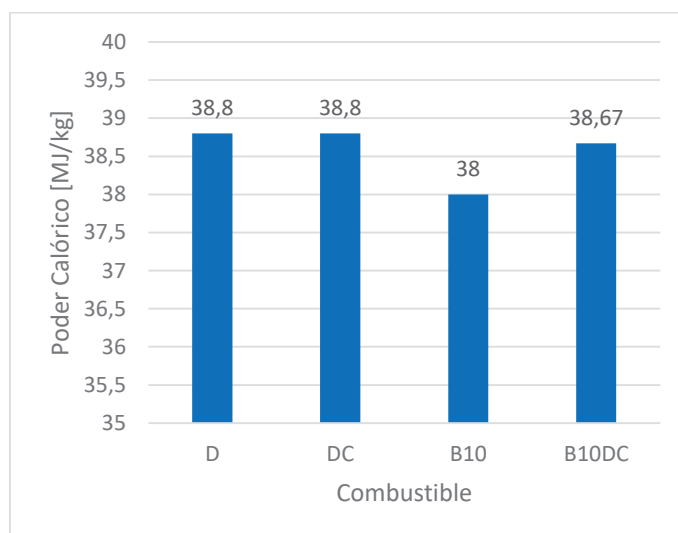


Figura 3. 3. Variación del Poder Calórico.

(Fuente: Propia)

Con respecto al combustible D se puede notar no existe variación en el poder calorífico con la mezcla DC, la mezcla B10 presentó una reducción del 2.06% y la mezcla B10DC presentó una reducción porcentual del 0.34%.

Trabajos de investigación como [18], [19], [41], [42], [82], sostienen la disminución del poder calorífico en función del porcentaje de biodiésel; esto se debe a que el poder calorífico de biodiésel de origen vegetal es inferior al de origen fósil, además el diésel contiene más carbono e hidrógeno lo cual genera un mayor poder calorífico que el biodiésel puesto que este último contiene más oxígeno en su composición. Además el

poder calórico tiene una relación inversa con el consumo de combustible, es decir, a un menor poder calórico el consumo de combustible aumenta y viceversa.

3.1.1.4. Densidad

La densidad aumenta cuando se mezcla el diésel con biodiésel, mientras que cuando se utiliza el óxido de cerio la densidad no presenta cambios, esto se puede observar de mejor manera en la Figura 3.4.

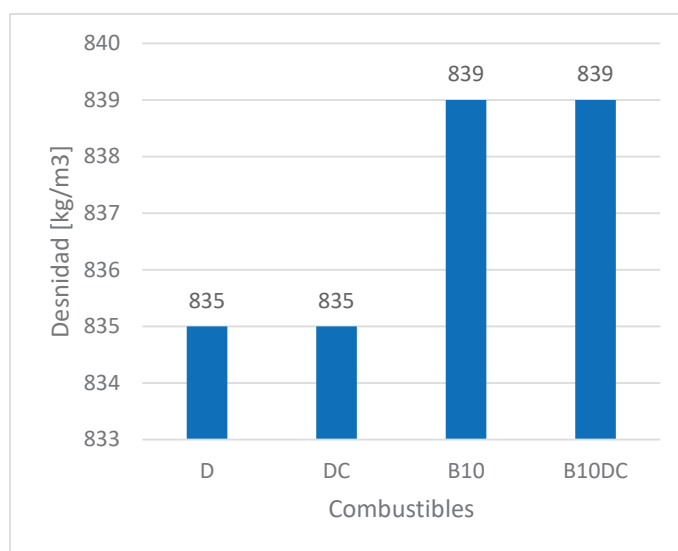


Figura 3. 4. Densidad de cada una de las mezclas ensayadas.

(Fuente: Propia)

Al comparar el cambio porcentual de la densidad entre el diésel D y los demás combustibles ensayados en el presente estudio se puede notar que el óxido de cerio no afecta a la densidad de la mezcla y que el biodiésel aumenta la viscosidad de la mezcla en un 11.57%.

Entonces se puede deducir que el óxido de cerio no incide en la densidad del combustible, por otra parte el aumento de la densidad de las mezclas de diésel con biodiésel fue reportado en los siguientes trabajos de investigación [18], [19], [40], [42], [82]. El incremento de la densidad se debe principalmente a que el biodiésel posee un mayor peso molecular que el diésel lo cual genera una elevada densidad.

3.1.1.5. Viscosidad Cinemática

En la Figura 3.5. se puede observar que el valor de la viscosidad cinemática aumenta cuando se mezcla tanto el diésel con biodiésel de aceite crudo de palma y el diésel con el aditivo.

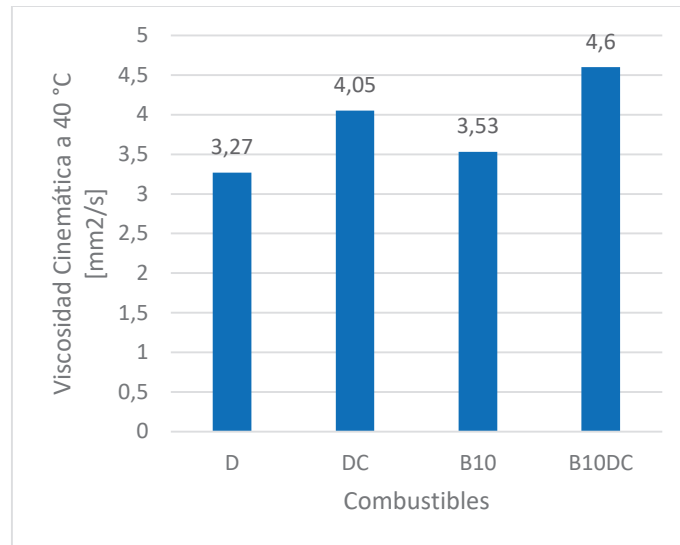


Figura 3. 5. Variación de la Viscosidad Cinemática.

(Fuente: Propia)

Los aumentos en la viscosidad de las mezclas DC, B10 y B10DC son de 23.85%, 7.91% y 40.67%, respectivamente comparado con el valor de la viscosidad cinemática del diésel de origen fósil (D).

El aumento de la viscosidad al emplear biodiésel es soportado por las investigaciones [18], [19], [40], [42], [82] las cuales presentaron resultados similares al analizar mezclas de diésel con biodiésel de aceite crudo de palma; esto se debe a que el biodiésel de palma posee físicamente una apariencia más viscosa, y en el presente caso, al ser de aceite crudo de palma este a temperatura ambiente es sólido por lo cual se lo debe precalentar antes de insertarlo en la línea de alimentación de combustible del vehículo de prueba. Por su parte las mezclas de diésel con óxido de cerio presentan un ligero incremento en su viscosidad cinemática [49], [83], [84].

3.1.2. Comportamiento de los gases de escape

El comportamiento de los gases de escape se encuentra ligado al ciclo de conducción que sea sometido el motor de prueba, en el presente caso es el IM-240, a continuación en la Figura 3.6. se muestra el ciclo de conducción.

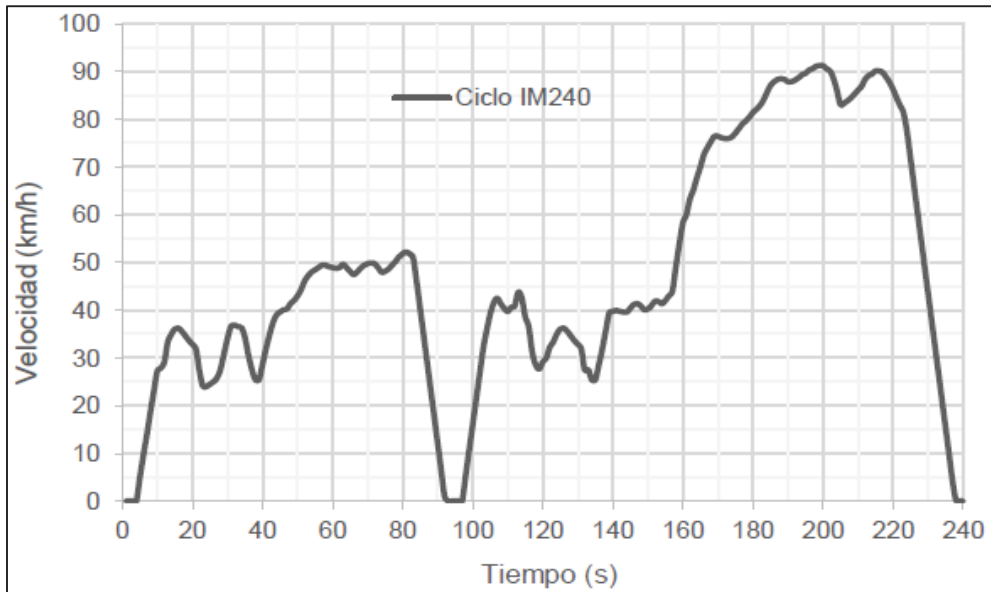


Figura 3. 6. Velocidad vs. tiempo del ciclo de conducción IM-240.

(Fuente: [24])

El comportamiento gráfico de las emisiones de gases de escape resultado del análisis para los combustibles utilizados, se muestran a continuación; los cuales permiten identificar la condición del registro de datos durante las pruebas y su variación con respecto a la duración del ciclo.

El comportamiento del CO, CO₂ y O₂ del diésel de origen fósil (D) se muestra en la Figura 3.7. y a su vez el comportamiento de los HC y NO_x se muestran en la Figura 3.8.

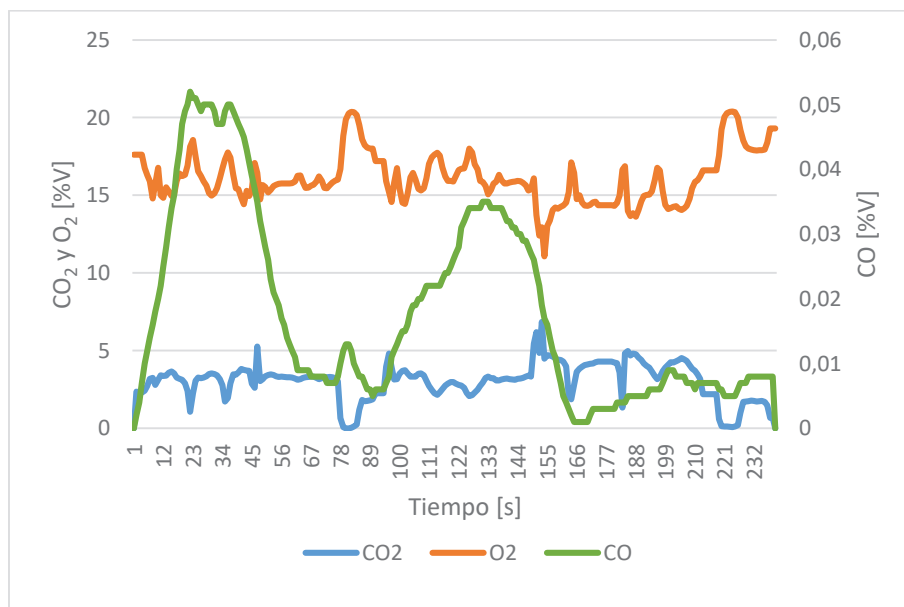


Figura 3. 7. Comportamiento de las emisiones de CO, CO₂ y O₂ del diésel de origen fósil (D).

(Fuente: Propia)

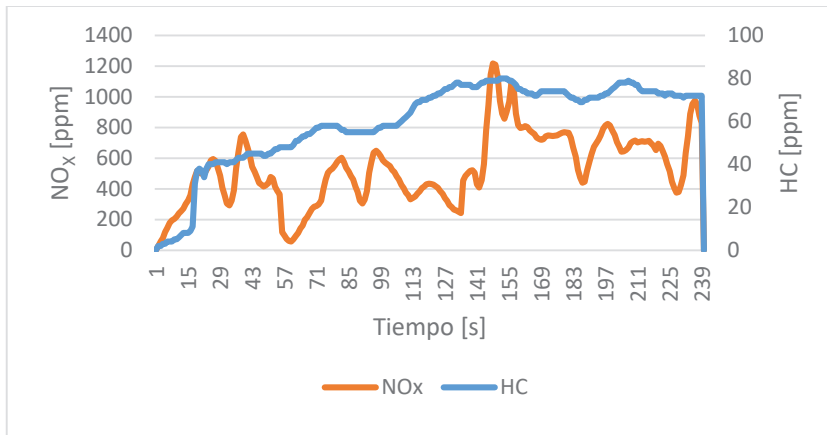


Figura 3. 8. Comportamiento de las emisiones de HC y NOx del diésel de origen fósil (D).

(Fuente: Propia)

El comportamiento del CO, CO₂ y O₂ del diésel de origen fósil con 10% de biodiésel supercrítico (B10) se muestra en la Figura 3.9. y a su vez el comportamiento de los HC y NOx se muestran en la Figura 3.10.

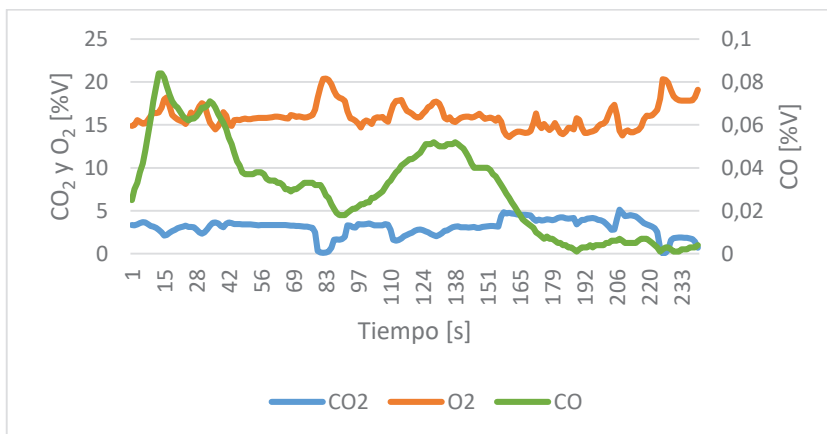


Figura 3. 9. Comportamiento de las emisiones de CO, CO₂ y O₂ de la mezcla (B10).

(Fuente: Propia)

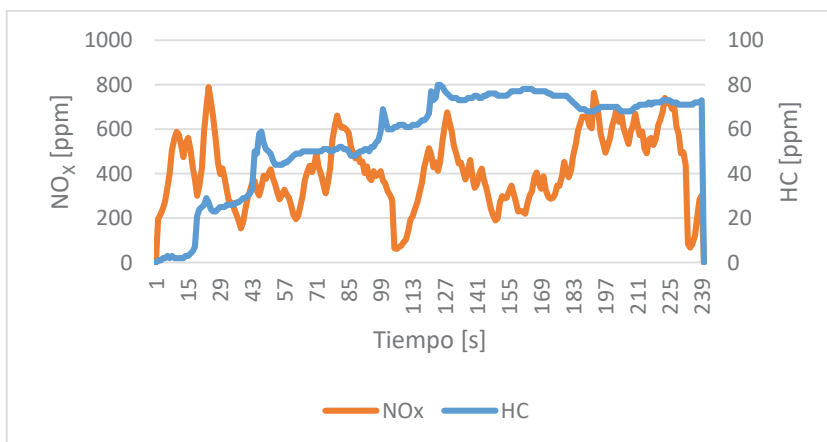


Figura 3. 10. Comportamiento de las emisiones de HC y NOx de la mezcla (B10).

(Fuente: Propia)

El comportamiento del CO, CO₂ y O₂ del diésel de origen fósil con 250ppm de óxido de cerio (DC) se muestra en la Figura 3.11. y a su vez el comportamiento de los HC y NO_x se muestran en la Figura 3.12.

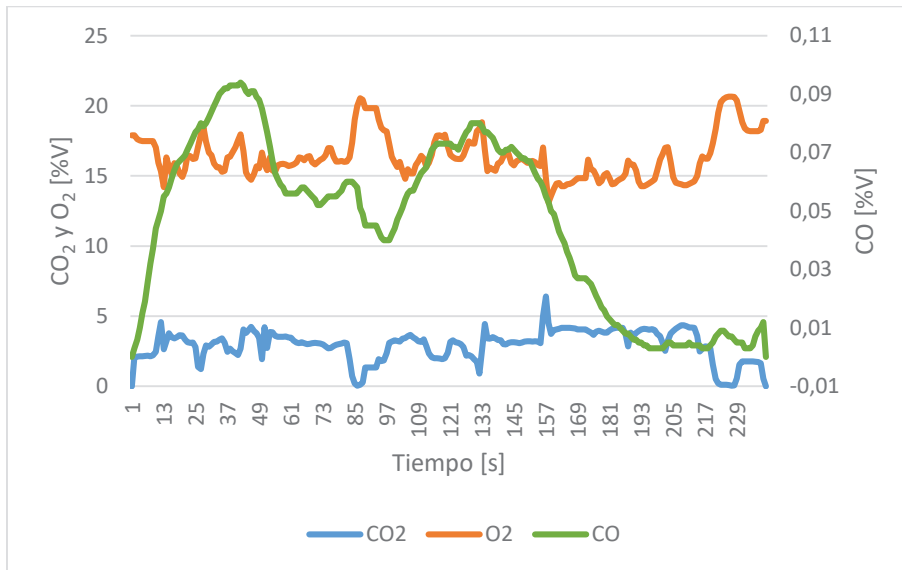


Figura 3. 11. Comportamiento de las emisiones de CO, CO₂ y O₂ de la mezcla (DC).

(Fuente: Propia)

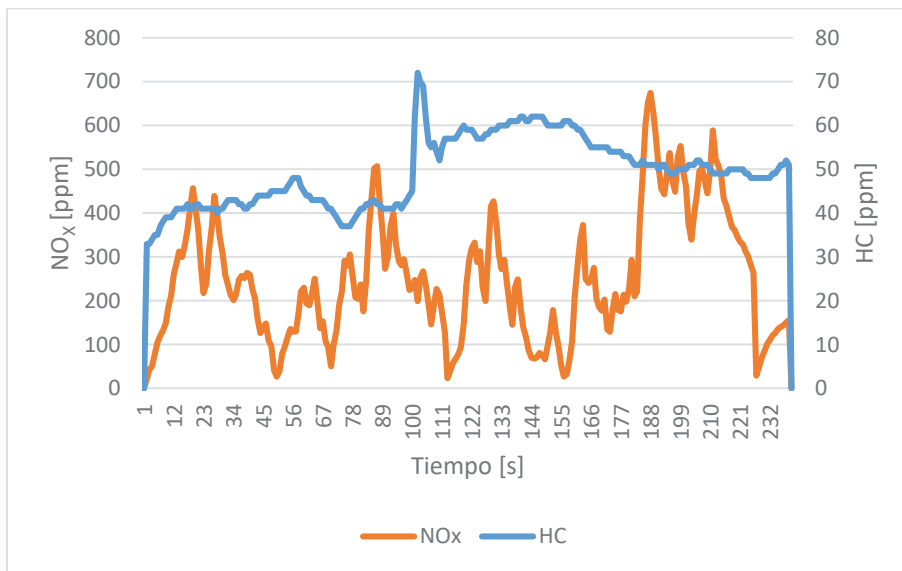


Figura 3. 12. Comportamiento de las emisiones de HC y NO_x de la mezcla (DC).

(Fuente: Propia)

El comportamiento del CO, CO₂ y O₂ del diésel de origen fósil con 10% de biodiésel supercrítico y con 250ppm de óxido de cerio (B10DC) se muestra en la Figura 3.13. y a su vez el comportamiento de los HC y NO_x se muestran en la Figura 3.14.

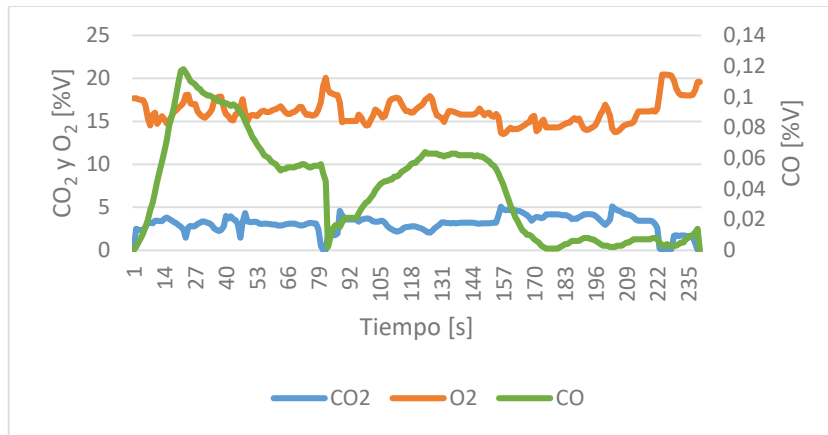


Figura 3. 13. Comportamiento de las emisiones de CO, CO₂ y O₂ de la mezcla (B10DC).

(Fuente: Propia)

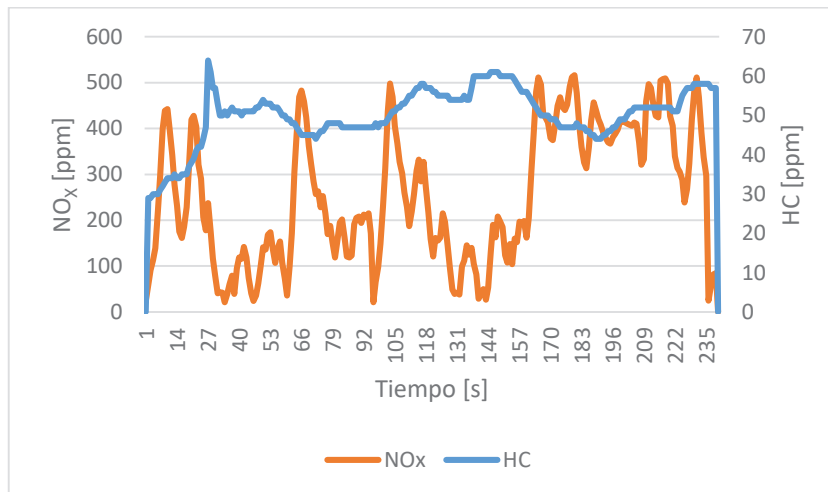


Figura 3. 14. Comportamiento de las emisiones de HC y NO_x de la mezcla (B10DC).

(Fuente: Propia)

En forma general, en las gráficas anteriores se puede notar que el comportamiento del CO₂ es inverso al comportamiento del O₂ para todos los combustibles, las gráficas de NO_x presentan la mayor cantidad de concentración volumétrica cuando el ciclo se encuentra en su máxima velocidad (> 90km/h), el CO y HC, por su parte, presentan el mismo comportamiento en todos los combustibles durante los 240 segundos.

Además de observar el comportamiento de los gases de escape el presente trabajo de estudio obtuvo el comportamiento de la temperatura de los gases de escape tomados sobre el múltiple de escape del motor del vehículo de prueba con ayuda de termocuplas, dicho comportamiento se puede observar en la Figura 3.15., en la cual se muestran las temperaturas de gases de escape durante el ciclo IM-240 con cada uno de los cuatro combustibles empleados diésel (D), diésel + 10% de biodiésel supercrítico (B10), diésel + 250ppm de óxido de cerio (DC) y diésel + 10% de biodiésel supercrítico + 250ppm de

óxido de cerio (B10DC). En el Anexo 1 se muestran las distintas temperaturas en función del tiempo.

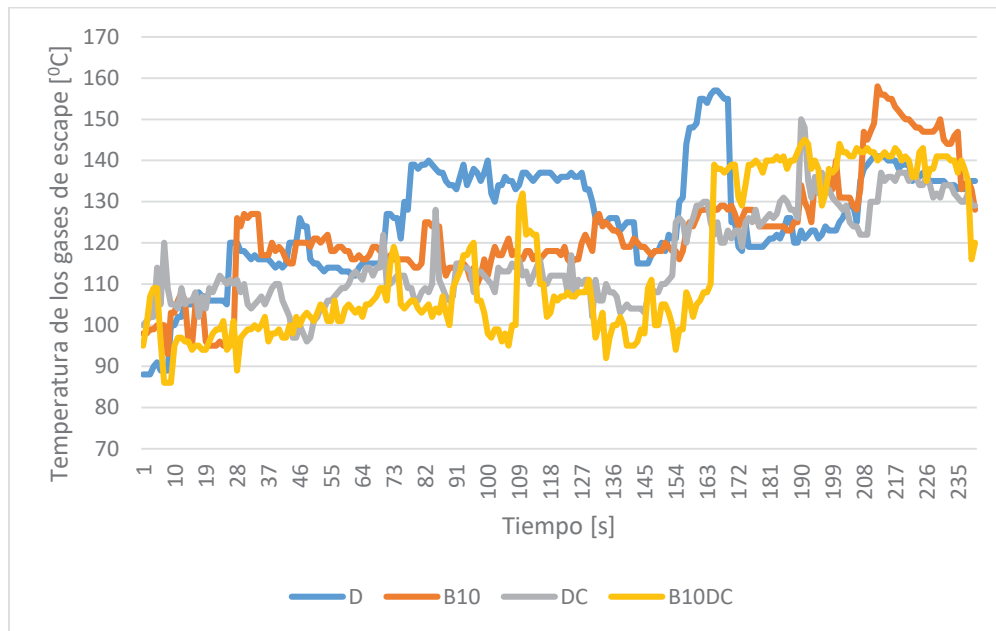


Figura 3. 15. Comportamiento de las temperaturas de gases de escape del motor.

(Fuente: Propia)

Se puede notar que el diésel de origen fósil genera una mayor temperatura durante el ciclo mientras los otros combustibles muestran una disminución de la temperatura; dicha disminución se discute en el siguiente apartado puesto que la temperatura tiene una relación con la formación de óxidos de nitrógeno.

3.1.3. Medición de las concentraciones de emisiones de gases de escape

Una vez realizado la toma de datos de las emisiones de gases de escape y su debido procesamiento estadístico se obtiene las medidas promedio de las concentraciones volumétricas y másicas de gases contaminantes como son el CO, HC, NO_x, O₂, CO₂, PM₁₀; tal como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Concentraciones promedio de cada mezcla de combustible.

COMBUSTIBLE	CO ₂ [%V]	CO [%V]	O ₂ [%V]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	PM ₁₀ [mg/m ³]
D	3,062	0,046	16,166	69	446	1,883
B10	3,405	0,034	15,655	60	374	1,552
DC	3,074	0,049	16,206	50	242	1,777
B10DC	3,183	0,042	16,113	51	216	1,402

Fuente: Propia

En el Anexo 2 se muestran todas las medidas de las concentraciones de emisiones de escape, a continuación se muestran las gráficas de las concentraciones promedio de cada uno de los gases en sus diferentes mezclas de combustibles, un análisis del cambio porcentual efectuado con cada mezcla de combustible y referencias bibliográficas que sostienen el presente trabajo de investigación.

3.1.3.1. Dióxido de Carbono (CO₂)

En el presente trabajo el CO₂ presentó una tendencia creciente, es decir, aumentó el CO₂ tanto con el uso del óxido de cerio como con el uso del biodiésel de aceite crudo de palma y la combinación de ambos, ver Figura 3.16.

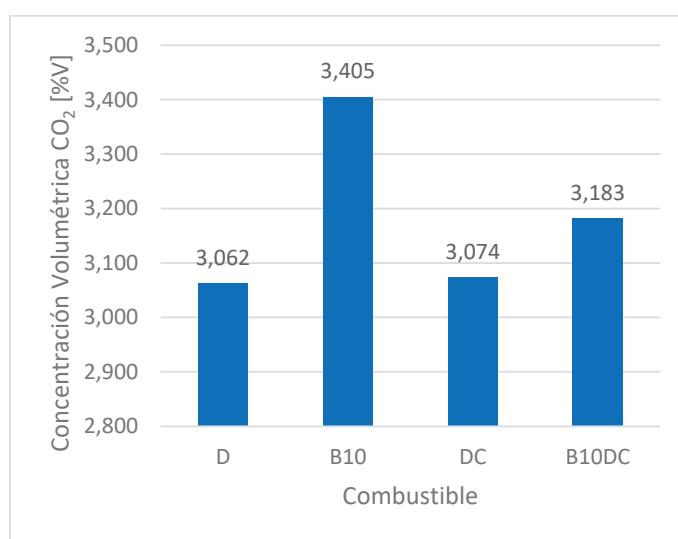


Figura 3. 16. Comportamiento del dióxido de carbono.

(Fuente: Propia)

La emisión de CO₂ del combustible B10, DC y B10DC aumentó en los siguientes porcentajes 11.20%, 0.37% y 3.93%, respectivamente a comparación del diésel comercial (D).

Otros autores presentan valores similares, es decir un aumento del CO₂ con la presencia de biodiésel de palma [18], [45], [47] y con el óxido de cerio [49]; dicho aumento es atribuido a una mejor combustión interna del motor ya que tanto el biodiésel como el aditivo son oxigenados lo cual provoca un aumento del CO₂ durante la combustión.

3.1.3.2. Monóxido de Carbono (CO)

En el presente trabajo de investigación, el CO decreció con el contenido de biodiésel y aumentó levemente con el aditivo, a continuación, en la Figura 3.17. se muestra el comportamiento del CO.

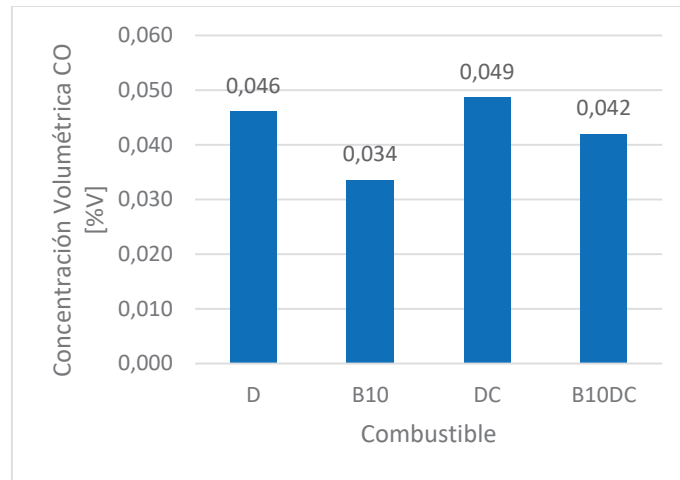


Figura 3. 17. Comportamiento del monóxido de carbono.

(Fuente: Propia)

En comparación de las emisiones de CO del diésel (D) se puede notar que las emisiones de CO de la mezcla B10 disminuyó en un 27.20%, con la mezcla DC el CO aumentó en un 5.47% y con la mezcla DCB10 el CO disminuyó en un 9.06%.

Trabajos de investigación similares presentan el mismo comportamiento decreciente al utilizar biodiésel proveniente de aceite crudo de palma [18], [21], [49] y el aumento del CO al emplear como aditivo al óxido de cerio [8], [55]; con mezclas de diésel de origen fósil.

3.1.3.3. Oxígeno (O₂)

En la Figura 3.18. se puede notar que la mezcla DC aumentó el contenido de O₂ mientras que en las demás mezclas el contenido de O₂ se disminuyó tomando como referencia el oxígeno del diésel.

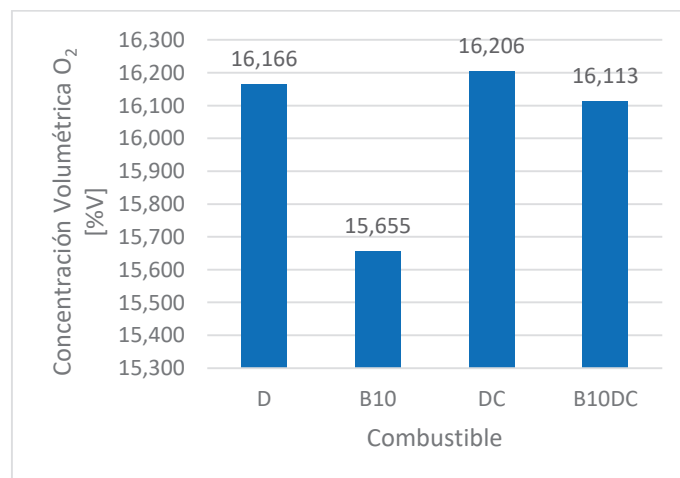


Figura 3. 18. Comportamiento del oxígeno.

(Fuente: Propia)

Las emisiones de O₂ de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una disminución de 3.16%, aumento en un 0.25% y disminución en un 0.33%, respectivamente, en comparación con las emisiones de oxígeno del diésel (D).

3.1.3.4. Hidrocarburos (HC)

En la Figura 3.19. se puede observar la variación del contenido de hidrocarburos en las emisiones de cada mezcla (D, DC, B10 y B10DC). Se puede evidenciar que la mezcla de diésel con óxido de cerio emite la menor cantidad de hidrocarburos a comparación de los demás combustibles.

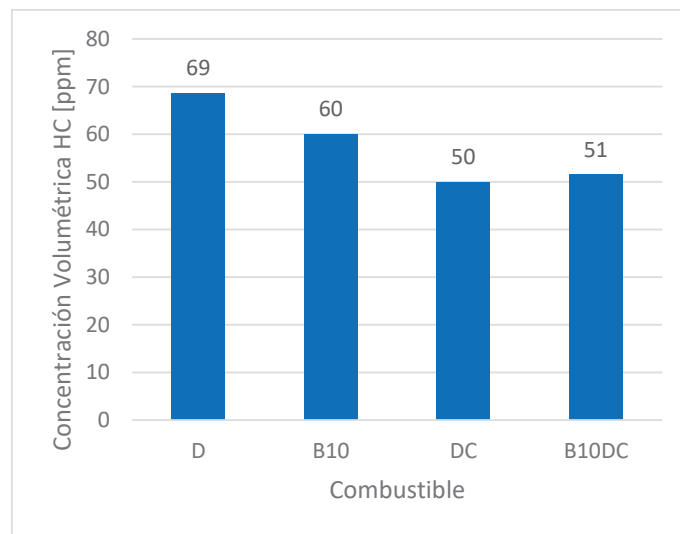


Figura 3. 19. Comportamiento de los hidrocarburos.

(Fuente: Propia)

Las emisiones de HC de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una disminución de 12.58%, 27.48% y 25.05%, respectivamente en comparación con las emisiones del combustible base, diésel de origen fósil (D).

Los trabajos de investigación [49], [53], [55], [56] sostienen que el uso de óxido de cerio ayuda en la disminución de hidrocarburos y por otra parte [21], [40], [41], [45], [47] reportaron disminución en las emisiones de HC al emplear biodiésel de aceite de palma.

3.1.3.5. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Las medidas promedio en concentraciones de los NO_x para cada mezcla B10, DC y B10DC presentó una medida decreciente en comparación con los NO_x promedio del diésel (D), ver Figura 3.20.

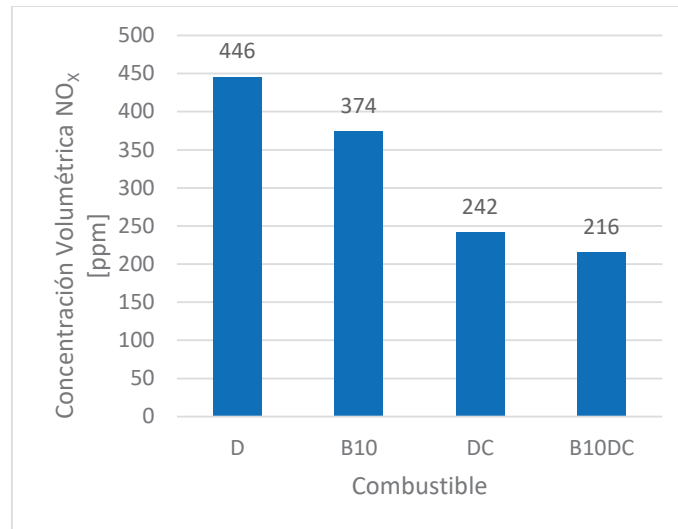


Figura 3. 20. Comportamiento de los óxidos de nitrógeno.

(Fuente: Propia)

La emisión de NO_x de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una disminución del 16.1%, 45.7% y 51.6%, respectivamente, en comparación con los NO_x del diésel (D).

La disminución de los óxidos de nitrógeno es una de las principales razones por las cuales se impulsa el uso de biocombustibles y aditivos, trabajos de investigación similares presentaron la misma tendencia en la reducción de NO_x al utilizar biodiésel de aceite de palma [21], [40], [46] y al utilizar el óxido de cerio como aditivo puesto que este actúa como un catalizador en la oxidación de los óxidos de nitrógeno [49], [53], [55], [56].

3.1.3.6. Temperatura de los gases de escape

La temperatura de los gases de escape tiene una correlación con la formación de NO_x en el proceso de combustión, varios autores la han demostrado entre los cuales se tiene [40], [85], [86] en donde se concluye que la relación entre NO_x y la temperatura de gases de escape es directa, es decir, a un aumento de óxidos de nitrógeno se tiene un incremento en la temperatura de los gases de escape y viceversa, a continuación en la Figura 3.21. se puede observar las temperaturas promedio de los gases de escape durante el ciclo de conducción IM-240.

En comparación con la temperatura del diésel (D) las mezclas de B10, DC y B10DC presentaron una disminución porcentual del 3.17%, 7.94% y 9.52%, respectivamente.

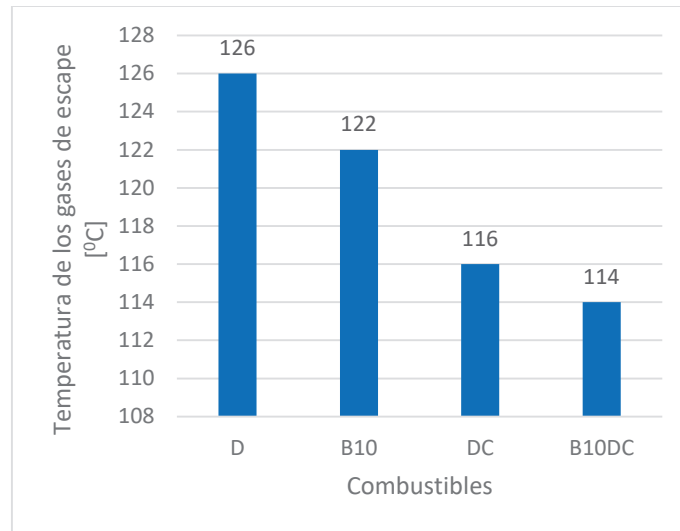


Figura 3. 21. Temperaturas promedio de los gases de escape durante el ciclo IM-240.

(Fuente: Propia)

Entonces dicha relación, disminución de óxidos de nitrógeno con la disminución de la temperatura de gases de escape, el presente estudio la corrobora; ya que en la Figura 3.20. los óxidos de nitrógeno decrecieron al emplear biodiésel y el óxido de cerio como aditivo y en la Figura 3.21. las temperaturas de dichos combustibles también disminuyó a comparación de la temperatura de gases de escape del diésel de origen fósil.

3.1.3.7. Material Particulado (PM₁₀)

Tanto el biodiésel de aceite crudo de palma como el óxido de cerio presentaron una menor emisión de PM₁₀ en comparación con el diésel de origen fósil, esto se puede observar en la Figura 3.22.

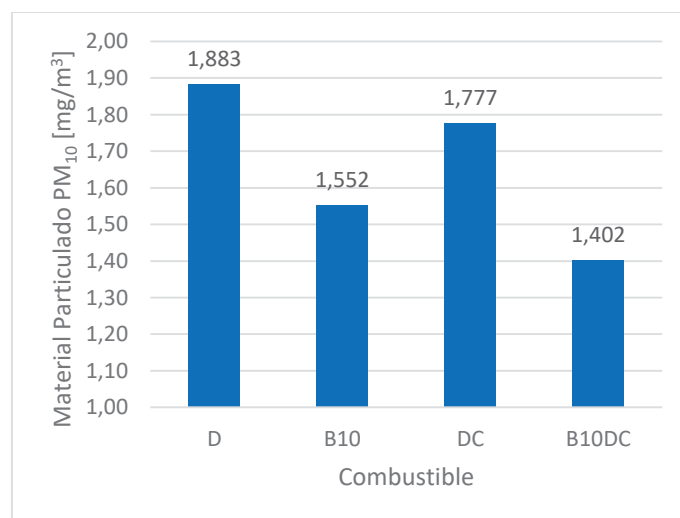


Figura 3. 22. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀

(Fuente: Propia)

La emisión de material particulado PM₁₀ de las mezclas B10, DC y B10DC presentaron una disminución de 17.56%, 5.64% y 25.57%, respectivamente, en comparación con el PM₁₀ del diésel (D).

La reducción de PM₁₀ es otra de las principales causas del porque utilizar un biocombustible y/o aditivo en proporciones dentro del diésel de origen fósil. Los trabajos de investigación presentan resultados similares al presente estudio, es decir, una reducción del material particulado tanto al utilizar biodiésel [40] como al utilizar el óxido de cerio [49].

3.1.3.8. Consumo de Combustible

La cantidad de consumo de combustible expresado en ml/km del motor empleado aumentó con el uso del biodiésel, mientras que con el aditivo no se muestra un cambio en el consumo de combustible; esto se puede notar en la Figura 3.23. En el Anexo 3 se muestra el consumo de combustible de cada mezcla.

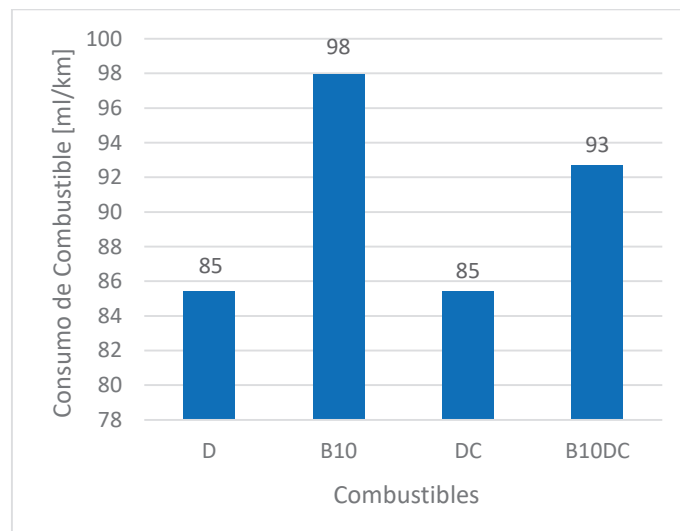


Figura 3. 23. Consumo de combustible.

(Fuente: Propia)

El consumo de combustible de las mezclas B10 y B10DC presentaron una tendencia creciente de aproximadamente 14.6% y 8.5%, respectivamente, mientras que la mezcla DC no presentó ningún cambio en comparación en el consumo de combustible a comparación del diésel (D).

Las investigaciones [7], [17], [22] sostienen el aumento del consumo de combustible al utilizar biodiésel proveniente de aceite crudo de palma; debido principalmente a que el biodiésel posee un poder calorífico menor al del diésel y esto provoca que el motor demande más combustible para poder generar su comportamiento normal. Por su parte

el óxido de cerio según el presente estudio no muestra un aumento o disminución del consumo de combustible.

A continuación, Figura 3.24., se muestra el análisis del cambio porcentual de las concentraciones de emisiones de gases de escape incluyendo el consumo de combustible.

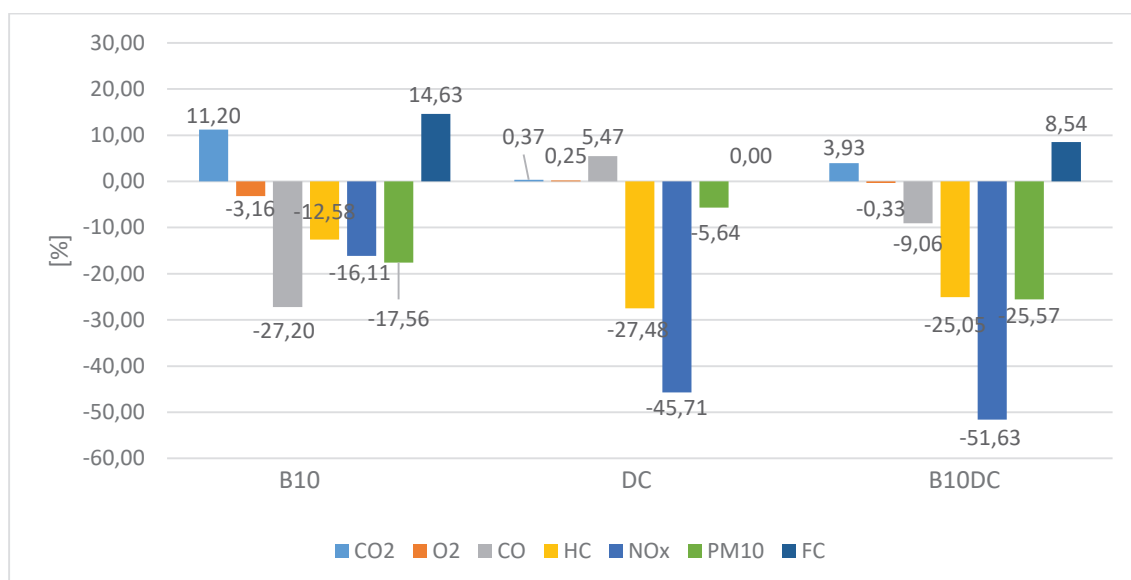


Figura 3. 24. Cambio porcentual de los diferentes gases de escape y del consumo de combustible en función de los tipos de combustibles empleados.

(Fuente: Propia)

Se puede notar que decrecen las emisiones de HC, NO_x y PM₁₀ con todos los combustibles; en cambio el CO₂ aumenta en todos los casos y los otros gases presentan cambios al utilizar el diésel ya sea con biodiésel y/o con óxido de cerio.

Entonces una vez determinada la densidad de cada combustible, la concentración volumétrica de los gases y el consumo de combustible; es posible calcular los factores de medición utilizando la ecuación simplificada de la combustión.

3.1.4. Medición de los factores de emisión

Una vez conocidas las propiedades químicas de las mezclas y sus concentraciones promedio de emisiones contaminantes se procedió a calcular los factores de emisión aplicando el modelo simplificado de la combustión con previo conocimiento de la tendencia del consumo de combustible de cada mezcla ensayada. Los resultados de los factores de emisión del CO, HC y NO_x se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Factores de Emisión obtenidos.

FACTORES DE EMISIÓN	D	B10	DC	B10DC
FCO (g/Km)	2,060	1,588	2,188	1,981
FHC (g/Km)	0,464	0,420	0,335	0,361
FNO _x (g/Km)	2,140	1,871	1,158	1,092

Fuente: Propia

3.1.4.1. Factor de Emisión del Monóxido de Carbono (FCO)

El comportamiento del factor de emisión del monóxido de carbono de los combustibles utilizados se muestra en la Figura 3.25.

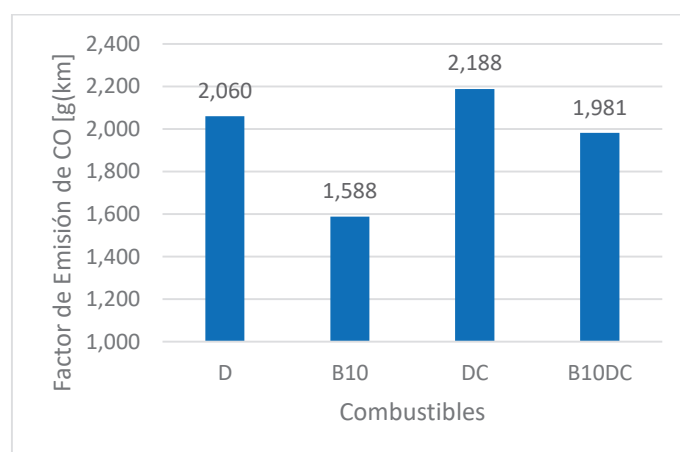


Figura 3. 25. Comportamiento del factor de emisión CO.

(Fuente: Propia)

Los factores de emisión de monóxido de carbono (FCO) expresados en g/km de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una reducción de 22.95%, incremento del 6.21% y reducción del 3.85%, respectivamente, a comparación del FCO del diésel (D).

Entonces del gráfico anterior se puede notar que el factor de emisión del monóxido de carbono se encuentra directamente ligado al comportamiento en concentración volumétrica del monóxido de carbono puesto que muestran la misma tendencia para todos los combustibles.

3.1.4.2. Factor de Emisión de Hidrocarburos (FHC)

Los factores de emisión de los hidrocarburos obtenidos en el presente estudio se pueden observar en la Figura 3.26.

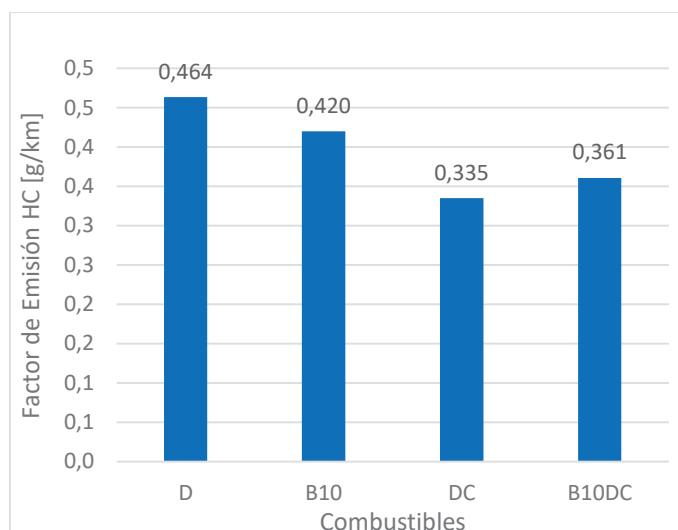


Figura 3. 26. Comportamiento del factor de emisión HC.

(Fuente: Propia)

Los factores de emisión de los hidrocarburos (FHC) expresados en gramos por kilómetro de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una disminución del 9.35%, 27.75% y 22.17%, respectivamente, en comparación del diésel (D). Del gráfico anterior se puede notar los FHC presentan la misma tendencia que los hidrocarburos en concentración volumétrica.

3.1.4.3. Factor de Emisión de los Óxidos de Nitrógeno (FNO_x)

El comportamiento de los factores de emisión de los óxidos de nitrógeno de los combustibles D, B10, DC y B10DC se muestra en la Figura 3.27.

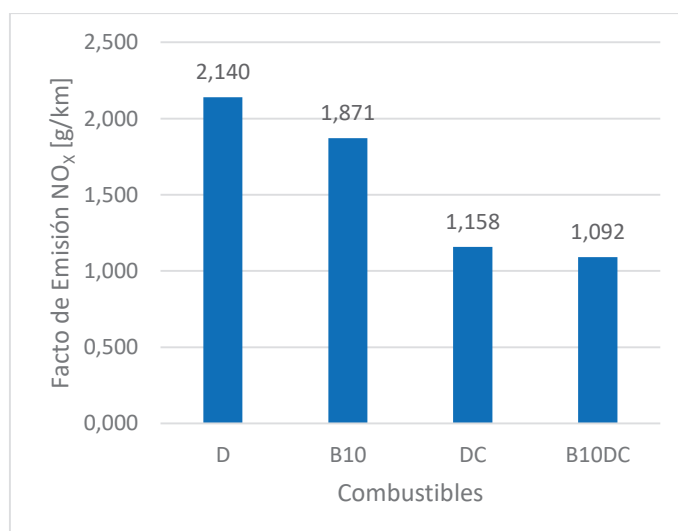


Figura 3. 27. Comportamiento del factor de emisión NO_x.

(Fuente: Propia)

Los factores de emisión de los óxidos de nitrógeno (FNO_x) de los combustibles B10, DC y B10DC presentaron una disminución del 12.58%, 45.90% y 48.98%, respectivamente, en comparación con el FNO_x del diésel (D). Se puede notar que el comportamiento de la Figura 3.27 es similar al comportamiento que presentaron los óxidos de nitrógeno en concentración volumétrica, Figura 3.20.

A continuación en la Figura 3.28. se muestra la variación porcentual de los distintos factores de emisión con respecto a los cuatro combustibles ensayados en el presente estudio D, B10, DC y B10DC.

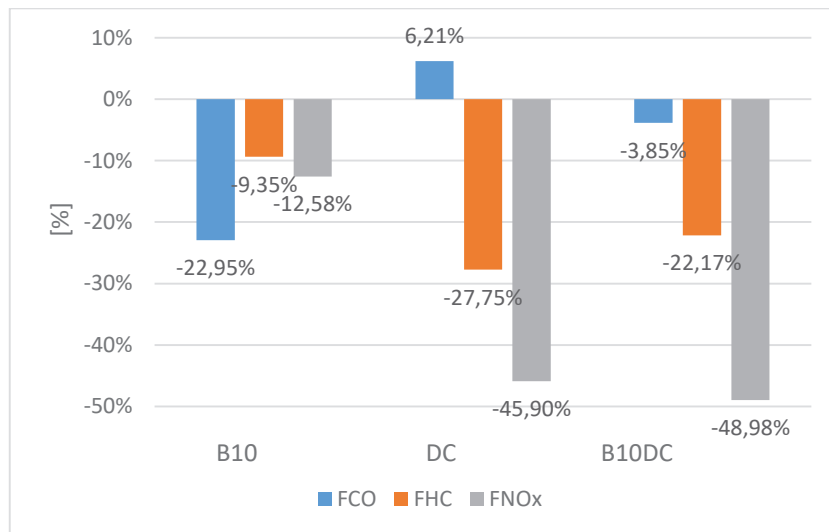


Figura 3. 28. Variación porcentual de los factores de emisión FCO, FHC y FNO_x.

(Fuente: Propia)

Entonces el combustible que emite un menor factor de emisión de hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) es la mezcla de diésel con 10% de biodiésel supercrítico más óxido de cerio de 250ppm (B10DC) ya que reduce la emisión en un 3.85%, 22.17% y 48.98% de los factores de emisión de FCO, FHC y FNO_x, respectivamente, en comparación con los factores de emisión generados por el diésel de origen fósil.

En el siguiente capítulo se indican las conclusiones en función de los resultados obtenidos en el presente estudio y también recomendaciones de trabajos a futuro con el fin de ahondar aún más en la investigación tanto de biocombustibles, aditivos y por supuesto en las emisiones de gases de escape de los motores de combustión interna de ciclo diésel.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

- Una vez finalizado el presente trabajo de investigación se cumplió con el principal objetivo de evaluar las emisiones de gases de escape de un motor de encendido por compresión utilizando mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio mediante el protocolo IM-240.
- Los resultados de la evaluación de gases de escape indicaron la reducción de hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM₁₀) al utilizar las mezclas B10, DC y B10DC en comparación con el diésel de origen fósil; en el motor turbo de cuatro cilindros, 3.0L, turbo diésel con inyección directa del vehículo de prueba.
- Los resultados de la caracterización física-química de las muestras de combustibles indican que el poder calorífico y en el consumo de combustible no es afectado por el óxido de cerio, mientras que el uso del biodiésel supercrítico provoca disminución del poder calorífico y una tendencia de un mayor consumo de combustible; todo esto en comparación con el diésel de origen fósil.
- Se determinó una relación directa entre el comportamiento de la temperatura de los gases de escape del motor con la generación de los óxidos de nitrógeno; en el presente estudio al utilizar las mezclas B10, DC y B10DC se obtuvo una disminución de la concentración de NO_x en comparación con el diésel (D) lo cual se relaciona con la disminución de las temperaturas de gases de escape medidas.
- Se determinó los factores de emisión generados por las mezclas de combustibles utilizadas; dentro de las cuales cabe destacar la importante reducción que presentó la mezcla B10DC con los siguientes porcentajes: factor de monóxido de carbono (FCO) - 3.9%, factor de hidrocarburos (FHC) - 22.2% y factor de óxidos de nitrógeno (FNO_x) - 48.9%, en comparación con los factores de emisión del diésel de origen fósil.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar la mezcla de combustible B10DC en una flota de vehículos y analizar la disminución de su impacto ambiental en comparación con los gases de escape generados por el diésel.
- Para utilizar los combustibles B10, DC y B10DC, se debe emplear un precalentador en el sistema de inyección del motor del vehículo de prueba.

- Se recomienda determinar la incidencia del biodiésel supercrítico y del óxido de cerio en las prestaciones mecánicas de un motor realizando ensayos de torque y potencia.
- Se debe tomar las medidas de consumo de combustible cuando estas presenten una tendencia y una diferencia no muy significativa entre las mismas.
- Para que este estudio tenga un impacto positivo en la comunidad se recomienda la difusión de los resultados de esta investigación a las autoridades competentes, misma que servirá de punto de partida para el estudio, la investigación y la posible implementación de biocombustibles y aditivos con el fin de mejorar la calidad del aire en el país.

4.3. Trabajos futuros

- Se propone utilizar la mezcla B10DC en un motor estacionario y analizar su proceso de combustión con ayuda de cámaras termográficas para entender de mejor manera la disminución de la temperatura de gases de escape.
- Para trabajos a futuro se recomienda variar el contenido de óxido de cerio en las mezclas con el diésel y analizar la incidencia del mismo desde el punto de vista de las prestaciones mecánicas del motor como en las emisiones de gases de escape.
- Para tener un análisis más completo de las emisiones de gases de escape de un motor se requiere estudiar y evaluar el material particulado (PM_{2.5}) y el número de partículas en las mezclas de diésel, biodiésel supercrítico y óxido de cerio.

Referencias Bibliográficas

- [1] Secretaría del Ambiente, "Informe de la Calidad del Aire-2016 Distrito Metropolitano de Quito", p. 62, may 2017.
- [2] World Health Organization, "Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP", First Results, 2013.
- [3] O. US EPA, "Particulate Matter (PM) Basics", US EPA, 19-abr-2016. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>.
- [4] D. G. Madruga y R. F. Patier, "Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica", p. 14, 2006.
- [5] Ecologistas en Acción, "Ozono troposférico", 01-dic-2013. [Online]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=27108>.
- [6] MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co KG, "Single Roller Dynamometer MSR 500/2 CAR 4WD (LPS 3000)". [Online]. Available: <https://www.maha.de/single-roller-dynamometer-msr-500-2-car-4wd-lps-3000.htm>.
- [7] M. Suresh, C.P. Jawahar and Arun Richard, "A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends", ScienceDirect, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302788>.
- [8] V. Arul Mozhi Selvan, R. B. Anand, and M. Udayakumar, "Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine", Fuel, vol. 130, pp. 160-167, ago. 2014.
- [9] El Comercio, "Calidad del diésel mejora, pero la norma todavía es permisiva en Quito", [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/calidad-diesel-mejora-norma-quito.html>.
- [10] F. Payri and J. M. Desantes, "Motores de combustión interna alternativos". Barcelona: Reverté, 2011.
- [11] S. J. Fygueroa Salgado and J. O. Araque Maldonado, "El proceso de combustión en motores de combustión interna", 2005.
- [12] G. C. Vargas L., "Medición y evaluación de las emisiones de material particulado y opacidad en una flota de vehículos con motor ciclo diésel, utilizando una mezcla de diésel con 20% de queroseno", M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [13] F. Martín Martín and V. Sala Gómez, "Estudio comparativo entre los combustibles tradicionales y las nuevas tecnologías energéticas para la propulsión de vehículos destinados al transporte", 2004.
- [14] Pulkrabek Willard W., "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine". New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [15] Prezi.com. "Producción de diésel y gasolina", [Online]. Available: <https://prezi.com/zdny1qq1zbnh/produccion-de-diesel-y-gasolina/>.
- [16] 123RF. "Ilustración del diagrama de destilación fraccionada de petróleo crudo", [Online]. Available: https://es.123rf.com/photo_89121116_ilustración-del-diagrama-de-destilación-fraccionada-de-petróleo-crudo.html.
- [17] M.M Hasan and M.M. Rahman, "Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review", ScienceDirect. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303738>.
- [18] A. Nalgundwar, B. Paul, and S. K. Sharma, "Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropha", Fuel, vol. 173, pp. 172-179, jun. 2016.

- [19] I. M. Rizwanul Fattah, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, M. Mofijur, and M. J. Abedin, "Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends", *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 265-272, mar. 2014.
- [20] J Vázquez, "Biogás como combustible alternativo en automoción", M.S. thesis, Escuela de Ingenierías Industriales, España, 2013.
- [21] M. J. Abedin, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, S. M. A. Rahman, and I. M. R. Fattah, "Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine", *Ind. Crops Prod.*, vol. 59, pp. 96-104, ago. 2014.
- [22] O. M. Ali, R. Mamat, N. R. Abdullah, and A. A. Abdullah, "Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel-diesel blended fuel", *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 59-67, jul. 2015.
- [23] J. P. Alvite, "Sistemas auxiliares del motor", *Inyección diésel IV*. Editex, 2012.
- [24] J. C. Jima, "Evaluación de las emisiones de óxidos de nitrógeno en un motor de combustión interna ciclo diésel utilizando una mezcla diésel-queroseno mediante protocolo IM-240", M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2017.
- [25] C. Eugenio and F. Montalvo, "Evaluación del comportamiento y emisiones en un motor de combustión interna utilizando una mezcla diésel-queroseno", M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2016.
- [26] A. Miño, "Hidrodesulfurización del diésel automotriz", *PGE Petróleos & Gas*, n.º 015, dic-2017.
- [27] L. Karim, P. Flores, "Evaluación de la calidad del diesel 2 basado en sus propiedades cetánicas" M.S. thesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2004.
- [28] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos", NTE INEN 1489:2012.
- [29] Energía Solar, "Biocombustibles". [Online]. Available: <https://solar-energia.net/energias-no-renovables/biocombustibles>.
- [30] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Biodiesel Requisitos". NTE INEN 2482, 2009.
- [31] ASTM International - Standards Worldwide. "ASTM establece las normas para el biodiésel", [Online]. Available: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html.
- [32] C. Tejada, L. Tejada, A. Villabona and L. Monroy, "Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal", *Luna Azul*, n.º 36, may 2013.
- [33] M. Gürü and A. Keskin, "Evaluation of Biodiesel Production, Engine Performance, and Emissions", *J. Electron. Mater.*, vol. 45, n.º 8, pp. 3882-3888, ago. 2016.
- [34] G. T. Ang, K. T. Tan, and K. T. Lee, "Recent development and economic analysis of glycerol-free processes via supercritical fluid transesterification for biodiesel production", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 61-70, mar. 2014.
- [35] K. Zahan and M. Kano, "Biodiesel production from palm oil, Its by-products, and mill effluent: A Review", *ResearchGate*, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/327066949_Biodiesel_Production_from_Palm_Oil_Its_By-Products_and_Mill_Effluent_A_Review.
- [36] S. Rajamohan, R. Kasimani, P. Ramakrishnan and M. Shameer, "A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels", *ResearchGate*, 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320820164_A_review_on_the_properties_performance_and_emission_aspects_of_the_third_generation_biodiesels.
- [37] American Society for Testing Materials ASTM, "Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels", vol. ASTM D6751. 2016, p. 12.
- [38] American Society for Testing Materials ASTM, "Standard specification for diesel fuel oil, biodiesel blend (B6 to B20)", vol. ASTM D7467. 2018, p. 23.

- [39] BIO BLOG, "Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods.", DIN EN 14214, 2003.
- [40] H. Nidal and K. Alnefaie, "A comparative study of almond and palm oils as two bio-diesel fuels for diesel engine in terms of emissions and performance", ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/272891474_A_comparative_study_of_almond_and_palm_oils_as_two_bio-diesel_fuels_for_diesel_engine_in_terms_of_emissions_and_performance.
- [41] "A comparative study on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel blends with and without an additive", ScienceDirect. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118305556>.
- [42] S. Senthur Prabu, M. A. Asokan, S. Prathiba, S. Ahmed, and G. Puthean, "Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine", *Renew. Energy*, vol. 122, pp. 196-205, jul. 2018.
- [43] S. Imtenan, H. Masjuki, M. Varman, M. Kalam, M. Arbab, H. Sajjad and S. Ashrafur, "Impact of oxygenated additives to palm and jatropha biodiesel blends in the context of performance and emissions characteristics of a light-duty diesel engine", *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, pp. 149-158, jul. 2014.
- [44] A. Ashrafur, H. Masjuki, M. Kalam, H. Rashedul, H. Sajid and M. Abedin, "Influence of anti-corrosion additive on the performance, emission and engine component wear characteristics of an IDI diesel engine fueled with palm biodiesel", ScienceDirect. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414006189>.
- [45] A. Sanjid, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, S. M. A. Rahman, M. J. Abedin, and S. M. Palash, "Production of palm and jatropha based biodiesel and investigation of palm-jatropha combined blend properties , performance , exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine", *Cleaner Production*, 2014.
- [46] M. A. Vieira da Silva, B. Lagnier Gil Ferreira, L. G. da Costa Marques, A. Lamare Soares Murta, and M. A. Vasconcelos de Freitas, "Comparative study of NO_x emissions of biodiesel-diesel blends from soybean, palm and waste frying oils using methyl and ethyl transesterification routes", *Fuel*, vol. 194, pp. 144-156, abr. 2017.
- [47] «Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine - Dimensions». [Online]. Available: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1002345564>.
- [48] Ruta 401 y test, "Aditivos para motores diésel: 4 tipos existentes en el mercado". [Online]. Available: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-aditivos-motores-diesel>.
- [49] E Jiaqiang, Z. Zhiqing, C. Jingwei, P. MainhHieu, Z. Xiaohuan, P. Qingguo, Z. Bin and Y. Zibin, "Performance and emission evaluation of a marine diesel engine fueled by water biodiesel-diesel emulsion blends with a fuel additive of a cerium oxide nanoparticle", *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, pp. 194-205, ago. 2018.
- [50] American Elements, "Cerium Oxide", [Online]. Available: <https://www.americanelements.com/cerium-oxide-1306-38-3>.
- [51] Materials, "Óxido de cerio". [Online]. Available: [/cmematerials/es/content/%C3%B3xido-de-cerio](https://www.materials.com/es/content/%C3%B3xido-de-cerio).
- [52] A. Prabu and R. B. Anand, "Emission control strategy by adding alumina and cerium oxide nano particle in biodiesel", *J. Energy Inst.*, vol. 89, n.º 3, pp. 366-372, ago. 2016.
- [53] B. Jothi, E. James, Loganathan and C. Saravanan, "Emission reduction from a diesel engine fueled by cerium oxide nano-additives using scr with different metal oxides coated catalytic converter", ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/284921116_Emission_reduction_from_a

- _diesel_engine_fueled_by_cerium_oxide_nano-additives_using_scr_with_different_metal_oxides_coated_catalytic_converter.
- [54] V. A. M. Selvan, R. B. Anand, and M. Udayakumar, "Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4, n.º 7, p. 6, 2009.
 - [55] V. Sajith, C. B. Sobhan, and G. P. Peterson, "Experimental Investigations on the Effects of Cerium Oxide Nanoparticle Fuel Additives on Biodiesel", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2, p. 581407, ene. 2010.
 - [56] P. Appavu and M. V. Ramanan, "Study of emission characteristics of a diesel engine using cerium oxide nanoparticle blended pongamia methyl ester", *Int. J. Ambient Energy*, vol. 0, n.º 0, pp. 1-4, may 2018.
 - [57] A. Anbarasu and A. Karthikeyan, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Using Cerium Oxide Nanoparticle Blended Biodiesel Emulsion Fuel", *J. Energy Eng.*, vol. 142, n.º 1, p. 04015009, mar. 2016.
 - [58] A. K. Pandey, M. Nandgaonkar, U. Pandey, S. Suresh, and A. Varghese, "The Effect of Cerium Oxide Nano Particles Fuel Additive on Performance and Emission of Karanja Biodiesel Fueled Compression Ignition Military 585kW Heavy Duty Diesel Engine", *SAE International*, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2018-01-1818, sep. 2018.
 - [59] J. M. Paul, "Emission characteristics of cerium oxide nanoparticle blended emulsified biodiesel", *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, vol. 4, n.º 3, p. 4.
 - [60] N. Y. Rojas, "Review of particulate emissions by diesel and biodiesel cumbustión", *Rev. Ing.*, n.º 20, pp. 58-68, nov. 2004.
 - [61] R. González Oropeza, "Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte", *Ing. Investig. Tecnol.* vol. 6, n.º 003, nov. 2009.
 - [62] Dieselnet, "Emission Test Cycles: IM240". [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/im240.php>.
 - [63] Sierra Research, Inc, "I/M Lookup Table Update", en Report No. SR98-09-03, Sacramento California 95814, 1998, p. 41.
 - [64] GOIB, "Sección de atmósfera-Factores de emisión". [Online]. Available: http://www.caib.es/sites/atmosfera/es/factores_de_emision_-58153/.
 - [65] Urbina A., "Comparación de factores de emisión vehicular al utilizar ciclos de conducción IM240 y On Board en la ciudad de Quito", M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2016.
 - [66] R. M. Revelo R., "Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240", M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
 - [67] B. C. Singer and R. A. Harley, "A Fuel-Based Motor Vehicle Emission Inventory", *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 46, n.º 6, pp. 581-593, jun. 1996.
 - [68] Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, "Guía práctica para el cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)", presentado en Cambio Climático, España, 2011, p. 67.
 - [69] Quito Ambiente, "Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire". [Online]. Available: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/norma-ecuatoriana-de-la-calidad-del-aire>.
 - [70] Ministerio del Ambiente del Ecuador, "Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire". 2011, p. 10. [Online]. Available: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/norma_ecuato_calidad.pdf
 - [71] Dieselnet, "Emission Standards: USA: Cars and Light-Duty Trucks Tier 1". [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/us/ld.php>.

- [72] Dieselnet, "Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks". [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.
- [73] Total Blog Expertos en lubricantes para tu motor "Euro 6C, así evoluciona la lucha contra las emisiones » Total Blog: Expertos en lubricantes para tu motor", 08-may-2018. [Online]. Available: <http://blog.total.es/euro-6c/>.
- [74] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel", NTE INEN 2207, 2002.
- [75] Parr Instrument Company, "4848 Reactor Controller SpecView - Parr Instrument Company". [Online]. Available: <https://www.parrinst.com/products/controllers/4848-reactor-controller/specview/>.
- [76] Br, "Fully Automatic D1160 Specifications by B/R Instrument". [Online]. Available: <https://www.brinstrument.com/astm-d1160/astm-d1160-fully-automatic-specifications.php>.
- [77] A. Khalid, N. Tamaldin, M. Jaat, M. F. M. Ali, B. Manshoor, and I. Zaman, "Impacts of Biodiesel Storage Duration on Fuel Properties and Emissions", *Procedia Eng.*, vol. 68, pp. 225-230, ene. 2013.
- [78] MedicalExpo, "i Stir HP 550 - Agitador de laboratorio magnético / digital / de mesa by Nevation Technologies". [Online]. Available: <http://www.medicaexpo.es/prod/nevation-technologies/product-119057-839063.html>.
- [79] Axion RS, "Global MRV continues to lead the way in truly portable emissions measurement with the Axion TM R/S; a portable system weighing under 40lbs."
- [80] MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co KG, "Emission Tester MET 6.3 Combi Tester". [Online]. Available: <https://www.maha.de/emission-tester-met-6-3-combi-tester.htm>.
- [81] MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co KG, "Manuales de operación Tecnología para análisis de emisiones". [Online]. Available: <https://www.maha.de/manuales-de-operacion-tecnologia-para-analisis-de-emisiones.htm?rdeLocaleAttr=es>.
- [82] A. E. Atabani, M. Mofijur, H. H. Masjuki, I. A. Badruddin, M. A. Kalam, and W. T. Chong, "Effect of Croton megalocarpus, Calophyllum inophyllum, Moringa oleifera, palm and coconut biodiesel–diesel blending on their physico-chemical properties", *Ind. Crops Prod.*, vol. 60, pp. 130-137, sep. 2014.
- [83] A. C. Sajeevan and V. Sajith, "Synthesis of stable cerium zirconium oxide nanoparticle – Diesel suspension and investigation of its effects on diesel properties and smoke", *Fuel*, vol. 183, pp. 155-163, nov. 2016.
- [84] E. Khalife, M. Tabatabaei, B. Najafi, S. Mostafa, A. Gharehghani, P. Mohammadi, M. Aghbashlo, A. Ghaffari, Z. Khounani, T. Roodbar and M. Amran, "A novel emulsion fuel containing aqueous nano cerium oxide additive in diesel–biodiesel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions: Part I – Experimental analysis", *Fuel*, vol. 207, pp. 741-750, nov. 2017.
- [85] T. T. AL-Shemmeri and S. Oberweis, "Correlation of the NO_x emission and exhaust gas temperature for biodiesel", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, n.º 10, pp. 1682-1688, jul. 2011.
- [86] P. Wang and Y. C. L. lei L. Li, "Effect of Temperature on Reduction of NO_x and Soot in Diesel Exhaust with Perovskite-type Catalysts", *Procedia Eng.*, vol. 16, pp. 259-263, 2011.

ANEXOS

Anexo 1. Temperatura de gases de escape obtenidas durante el ciclo IM-240.

Tabla A. Temperatura de gases de escape vs. tiempo.

Tiempo (s)	Temperatura [°C]			
	D	B10	DC	B10DC
1	88	98	100	95
2	88	98	101	100
3	88	99	102	107
4	90	99	102	109
5	91	100	114	109
6	89	100	105	96
7	89	100	120	86
8	89	93	109	86
9	100	103	105	86
10	100	103	105	95
11	102	106	104	97
12	102	108	109	97
13	105	106	105	96
14	105	96	106	96
15	105	95	106	94
16	105	105	108	95
17	108	105	102	95
18	107	106	107	94
19	107	96	104	94
20	106	95	109	96
21	106	95	108	98
22	106	95	110	99
23	106	96	112	99
24	106	95	111	101
25	105	95	110	94
26	120	96	111	95
27	120	96	110	101
28	120	126	111	89
29	118	124	108	97
30	118	127	110	98
31	117	126	105	99
32	116	127	104	99
33	117	127	105	100
34	116	127	106	99
35	116	117	107	100
36	116	117	105	102
37	116	117	107	96

38	115	120	109	98
39	114	118	110	98
40	115	119	110	99
41	114	118	106	97
42	115	116	104	97
43	120	115	102	100
44	120	115	97	98
45	120	120	97	102
46	126	120	100	100
47	124	120	98	102
48	124	120	96	103
49	116	119	97	102
50	115	121	101	101
51	115	121	102	103
52	114	120	104	105
53	113	121	104	104
54	114	122	106	101
55	114	118	106	101
56	114	118	107	106
57	114	119	108	101
58	113	119	109	101
59	113	118	109	104
60	113	118	110	105
61	112	116	112	104
62	112	116	113	103
63	114	117	112	104
64	115	116	111	102
65	115	116	114	105
66	115	117	114	105
67	115	119	112	106
68	115	119	114	107
69	115	118	114	109
70	117	117	122	109
71	127	116	110	106
72	127	117	110	115
73	126	116	111	119
74	126	116	112	116
75	121	116	112	105
76	130	116	112	104
77	128	116	109	105

78	139	115	109	106
79	139	114	106	106
80	138	114	106	104
81	139	115	108	103
82	139	125	109	104
83	140	125	108	105
84	139	124	110	102
85	138	124	128	104
86	137	124	111	103
87	137	115	109	107
88	135	112	107	103
89	134	114	106	100
90	134	114	107	109
91	133	114	115	111
92	136	115	115	113
93	139	115	114	117
94	134	114	114	117
95	136	111	113	119
96	138	114	108	120
97	137	110	113	106
98	135	112	113	106
99	137	116	112	103
100	140	112	111	98
101	132	116	110	97
102	130	119	108	99
103	134	117	114	99
104	134	117	113	96
105	136	119	113	98
106	135	121	113	95
107	135	117	115	100
108	133	118	114	100
109	134	116	116	129
110	137	116	112	132
111	137	118	113	122
112	136	118	110	123
113	135	116	112	122
114	136	117	114	122
115	137	116	116	110
116	137	117	111	110
117	137	118	110	102
118	137	118	112	103
119	136	118	112	107
120	135	118	112	106
121	136	117	112	107

122	136	119	112	107
123	136	116	108	108
124	137	115	117	107
125	136	116	107	107
126	136	116	111	108
127	137	120	110	108
128	133	122	111	108
129	133	120	111	111
130	130	118	102	105
131	126	126	111	97
132	125	127	106	100
133	125	124	106	103
134	125	125	110	92
135	126	124	108	97
136	126	123	108	100
137	126	123	107	100
138	123	122	103	102
139	124	119	104	100
140	125	119	105	95
141	125	119	104	95
142	125	121	104	95
143	115	120	104	96
144	115	119	104	99
145	115	119	103	98
146	115	118	107	109
147	117	117	109	111
148	118	118	108	100
149	118	118	108	100
150	120	118	110	105
151	118	120	110	105
152	122	119	111	103
153	121	118	112	100
154	121	118	125	94
155	130	116	126	99
156	131	118	125	99
157	144	123	120	108
158	148	125	124	106
159	148	124	126	102
160	149	126	129	105
161	155	128	129	106
162	155	128	130	108
163	154	128	130	108
164	156	129	125	110
165	157	128	122	139

166	157	128	125	138
167	156	129	120	138
168	155	129	120	137
169	155	128	123	138
170	125	129	121	139
171	125	127	123	139
172	119	124	123	131
173	118	126	119	129
174	125	128	125	134
175	119	128	126	139
176	119	128	125	139
177	119	127	128	140
178	119	124	124	139
179	119	124	125	137
180	120	124	126	140
181	121	124	127	140
182	121	124	126	140
183	122	124	127	141
184	121	124	130	140
185	123	124	131	141
186	126	123	130	138
187	126	123	128	140
188	120	125	128	140
189	120	125	126	142
190	123	134	150	144
191	121	130	148	145
192	122	128	135	144
193	123	125	131	138
194	123	135	136	140
195	121	135	132	138
196	122	136	137	129
197	124	133	133	132
198	123	135	133	138
199	123	133	131	137
200	123	140	130	138
201	125	131	129	144
202	126	131	128	142
203	128	131	129	142

204	129	131	125	141
205	129	129	124	141
206	125	128	124	143
207	135	133	122	142
208	138	147	122	142
209	139	145	122	143
210	140	147	130	142
211	141	149	130	142
212	141	158	130	140
213	141	156	137	141
214	141	156	135	142
215	140	155	136	141
216	140	155	136	141
217	140	153	135	143
218	138	152	137	142
219	139	151	137	140
220	139	150	137	141
221	139	150	135	140
222	135	149	136	136
223	136	148	136	136
224	136	148	134	142
225	137	147	134	143
226	136	147	136	135
227	135	147	134	138
228	135	147	131	138
229	135	148	132	141
230	135	150	131	141
231	135	145	134	141
232	134	144	134	141
233	134	144	134	140
234	134	146	132	140
235	133	147	131	137
236	134	133	130	140
237	133	134	130	138
238	134	135	132	135
239	135	133	129	116
240	135	128	129	120
X	126	122	116	114

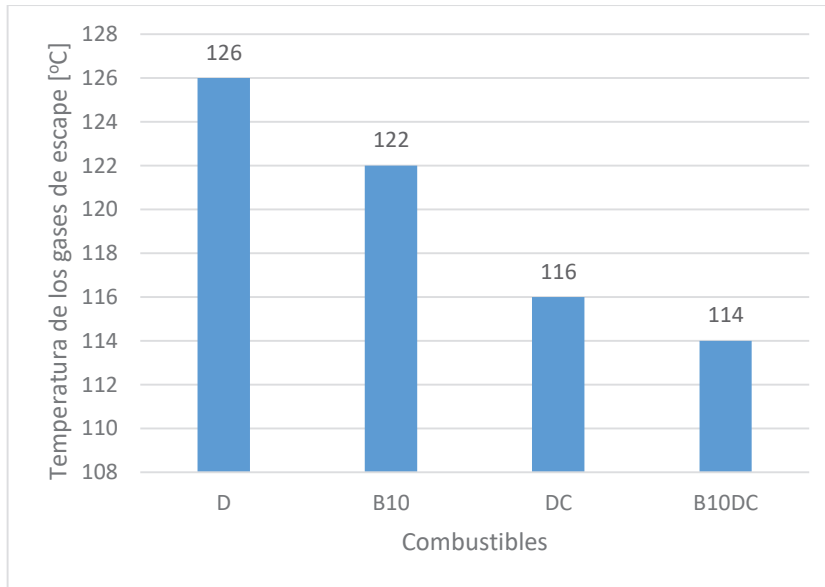


Figura A. Temperaturas promedio de las mezclas utilizadas.

Anexo 2. Medidas de las concentraciones de emisiones de escape

Tabla A. Concentración de gases de escape del diésel de origen fósil.

DIÉSEL (D)

No.	CO ₂ [%V]	CO [%V]	O ₂ [%V]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	PM ₁₀ [mg/m ³]
1	3,058	0,043	16,135	79	523	2,163
2	3,123	0,073	16,093	68	420	1,536
3	3,006	0,024	16,269	59	394	1,950
X	3,062	0,046	16,166	69	446	1,883

Tabla B. Concentración de gases de escape de la mezcla B10.

DIÉSEL + BIODIÉSEL SUPERCRÍTICO 10% (B10)

No.	CO ₂ [%V]	CO [%V]	O ₂ [%V]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	PM ₁₀ [mg/m ³]
1	3,017	0,046	14,747	56	364	1,453
2	4,121	0,024	16,197	65	365	1,128
3	3,078	0,031	16,021	59	393	2,076
X	3,405	0,034	15,655	60	374	1,552

Tabla C. Concentración de gases de escape de la mezcla DC.

DIÉSEL + ÓXIDO DE CERIO 250ppm (DC)

No.	CO ₂ [%V]	CO [%V]	O ₂ [%V]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	PM ₁₀ [mg/m ³]
1	2,999	0,048	16,070	53	251	2,037
2	3,094	0,052	16,222	47	244	1,487
3	3,128	0,047	16,326	49	231	1,807
X	3,074	0,049	16,206	50	242	1,777

Tabla D. Concentración de gases de escape de la mezcla B10DC.

DIÉSEL + BIODIÉSEL SUPERCRÍTICO 10% + ÓXIDO DE CERIO 250ppm (B10DC)

No.	CO ₂ [%V]	CO [%V]	O ₂ [%V]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	PM ₁₀ [mg/m ³]
1	3,134	0,043	16,122	50	216	1,739
2	3,303	0,040	16,133	52	211	1,356
3	3,111	0,042	16,085	53	220	1,110
X	3,183	0,042	16,113	51	216	1,402

Anexo 3. Consumo de combustible de las mezclas utilizadas.

La distancia recorrida en el ciclo de conducción IM-240 es de 3,2km.

Tabla A. Consumo de combustible del Diésel (D).

D		
1	230	ml
2	260	ml
3	330	ml
X	273,33	ml
FC	85	ml/km

Tabla B. Consumo de combustible del Diésel + 10% Biodiésel Supercrítico (B10).

B10		
1	310	ml
2	350	ml
3	280	ml
X	313,33	ml
FC	98	ml/km

Tabla C. Consumo de combustible del Diésel + Óxido de Cerio 250ppm (DC).

DC		
1	250	ml
2	260	ml
3	310	ml
X	273,33	ml
FC	85	ml/km

Tabla D. Consumo de combustible del Diésel + 10% Biodiésel Supercrítico + Óxido de Cerio 250ppm (B10DC).

DB10C		
1	320	ml
2	290	ml
3	290	ml
4	310	ml
5	270	ml
X	296,67	ml
FC	93	ml/km