



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIONES DURANTE EL CICLO EUROPEO NEDC EN UN MCIA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZANDO MEZCLAS DE COMBUSTIBLES DIÉSEL PREMIUM Y BODIESEL, PRODUCIDO POR TRANSESTERIFICACIÓN BÁSICA Y EN CONDICIONES SUPERCRÍTICAS

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
MAGÍSTER EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

**DIEGO LUIS LINCANGO TITE**

diego.lincango@epn.edu.ec

**KLEBER ALEXANDER VEGA FIALLOS**

kleber.vegaf@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR, MSc.**

angel.portilla@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. LILIANA GUZMÁN BECKMANN, MSc.**

liliana.guzman@epn.edu.ec

Quito, marzo 2019

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores DIEGO LUIS LINCANGO TITE Y KLEBER ALEXANDER VEGA FIALLOS, bajo mi supervisión.

---

Ing. Ángel Portilla, MSc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores DIEGO LUIS LINCANGO TITE Y KLEBER ALEXANDER VEGA FIALLOS, bajo mi supervisión.

---

Ing. Liliana Guzmán, MSc.

**CODIRECTORA DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Diego Luis Lincango Tite y Kleber Alexander Vega Fiallos, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra 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.

---

Diego Luis Lincango Tite

---

Kleber Alexander Vega Fiallos

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a Dios quien me ha dado inteligencia y fortaleza durante todos los momentos de mi vida y me ha llenado de fuerza y ganas para seguir adelante, razón por la cual hoy me encuentro en este grato momento de mi vida.

A mi esposa Cristina Vásconez quien me ha tenido paciencia y me ha empujado a dar lo mejor de mí cada día, gracias a su amor y cuidado me he convertido en un mejor ser humano capaz de lograr cualquier cosa, el presente trabajo es fruto de su esfuerzo y dedicación como mujer y compañera de vida, juntos hacemos un gran equipo.

A mi hijo Diego Nicolás quién es la luz de mi vida, al cual espero poder ser ejemplo de integridad y honestidad, con la finalidad de que tengas un camino por el cual puedas iniciar tu vida y ser un excelente ser humano.

A mis amigos y compañeros del CCICEV cuya ayuda fue indispensable en el desarrollo de este trabajo, gracias por ser un pilar de apoyo.

---

**Diego Luis Lincango Tite**

## **DEDICATORIA**

Dedico el trabajo de titulación a Dios, quien ha sido mi guía y me ha llenado de fortaleza y sabiduría para siempre tomar buenas decisiones y seguir creciendo en la parte académica y profesional.

A María Belén, que es una persona tan importante en mi vida y que siempre desde la distancia, y su amor incondicional estuvo para apoyarme.

A mi hijo Keylor Sebastián, que alegro mi vida y que es mi pequeño motorcito para seguir siendo mejor, además ser ejemplo de su vida.

A mis padres Kleber y Marcia, que son la muestra de esfuerzo y trabajo, y a mi hermana Jazmín, que es mi pequeña y con sus locuras siempre me roba el corazón.

A mis amigos que fueron un apoyo para culminar este camino, y a Diego quien aparte de a ver sido mi compañero de aula, compañero de trabajo fue un gran amigo y mentor en mi vida profesional.

---

**Kleber Alexander Vega Fiallos**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a la vida que me da cada mañana, a cada oportunidad que tengo de aprender y entender las cosas, a cada persona que me enseña que siempre hay otra manera de ver las cosas.

Agradezco a mis padres (Fátima y Luis) y hermanos (Carlos y Ana) quienes han sido mi respaldo y apoyo en cada instante de mi vida, compartir la vida con ustedes ha hecho que siga buscando mejores cosas para mi bienestar.

Agradezco al Ing. Ángel Portilla quien me brindó la oportunidad de demostrar mis conocimientos y experiencia y ha sabido guiarme en el desarrollo de este trabajo con sus conocimientos y experiencia permitiendo mi desarrollo profesional.

Agradezco a la Ing. Liliana Guzmán por haberme permitido formar parte del proyecto PIMI 10 – 15, para de esta forma poder aportar al desarrollo del mismo y poder crecer ampliar conocimientos dentro de este tema.

---

**Diego Luis Lincango Tite**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por darme vida y salud para llevar a cabo todos los objetivos que me he planteado.

Agradezco a María Belén por estar pendiente de mi hijo y aunque para ella fue un camino duro, quiero que sepa que a la distancia siempre serán un motivo para seguir adelante.

Agradezco a mis padres por siempre estar pendientes de cada paso que doy en mi vida.

Agradezco al Ing. Ángel Portilla, que muy aparte de ser mi profesor, mi tutor, fue la persona quien me brindó la oportunidad de trabajar en el CCICEV y gracias a él encontrar nuevas oportunidades profesionales.

---

**Kleber Alexander Vega Fiallos**



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Motor de Encendido por Compresión.....	3
1.1.1. Ciclo Diésel.....	3
1.1.2. Principio de funcionamiento.....	4
1.2. Proyecto PIMI 15-10.....	5
1.3. Combustibles: Diésel, Biodiesel.....	5
1.3.1. Diésel Premium.....	5
1.3.2. Biodiesel.....	7
1.3.3. Producción de biodiesel en condiciones supercríticas.....	8
1.3.4. Producción de biodiesel por catálisis.....	10
1.3.5. Comparación entre el método tradicional de transesterificación y el proceso de obtención en condiciones supercríticas.....	11
1.4. La Combustión.....	11
1.4.1. Estequiometría de la combustión.....	11
1.5. Emisiones Contaminantes.....	12
1.5.1. Clasificación de las emisiones.....	13
1.5.2. Emisiones Biodiesel.....	14
1.6. Control De Emisiones Contaminantes.....	15
1.6.1. Soluciones Activas.....	15
1.6.2. Soluciones Pasivas.....	16
1.7. Factores De Emisión.....	16
1.7.1. Modelo simplificado de la combustión.....	16
1.8. Ciclo de conducción.....	19
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. Equipos utilizados en la ejecución de ensayos.....	21
2.1.1. Analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM.....	21
2.1.2. Analizador de gases combinado para gasolina/diésel MET 6.3.....	22
2.1.3. Dinamómetro de chasis LPS3000.....	24
2.1.4. Tanque externo de combustible.....	27
2.1.5. Sistema de adquisición de datos de temperatura con placa Arduino y termocuplas.....	27
2.1.6. Vehículo de pruebas.....	27
2.2. Procedimientos.....	28
2.2.1. Procedimiento para la preparación del combustible previo a la ejecución de pruebas.....	28

2.2.2. Procedimiento para la determinación de factores de emisiones.....	29
2.2.3. Procedimiento para la determinación de la temperatura de gases de escape....	30
2.2.4. Determinación del rendimiento de motor.....	31
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	32
3.1. Resultado de medición de las emisiones contaminantes .....	32
3.1.1. Dióxido de carbono CO <sub>2</sub> [%] .....	36
3.1.2. Monóxido de carbono CO [%] .....	36
3.1.3. Hidrocarburo [ppm] .....	37
3.1.4. Óxidos de nitrógeno [ppm] .....	38
3.1.5. Oxígeno .....	39
3.1.6. Material particulado PM 2.5 [mg/m <sup>3</sup> ].....	39
3.1.7. Rendimiento de combustible .....	40
3.2. Análisis de los factores de emisiones contaminantes.....	42
3.2.1. Factor de emisión CO [Km/gl] .....	42
3.2.2. Factor de emisión HC [Km/gl] .....	43
3.2.3. Factor de emisión NO <sub>x</sub> [Km/gl] .....	43
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	46
4.1. Conclusiones .....	46
4.2. Recomendaciones .....	46
Referencias Bibliográficas .....	47
Anexos.....	49
Anexo 1 Valores de las pruebas realizadas.....	50
Anexo 1.1 Resultados promedio de las concentraciones de gases de escape obtenidas del desarrollo del ciclo NEDC.....	50
Anexo 1.2 Resultados promedio del rendimiento de motor expresado de km/gl obtenidos del desarrollo del ciclo NEDC.....	50
Anexo 1.3 Resultados de factores de emisiones utilizando mezclas BSC10 y BCB10.....	49
Anexo 2 Registros de las pruebas de Laboratorio.....	51
Anexo 2.1 Análisis de factores de emisión utilizando diésel comercial.....	51
Anexo 2.2 Análisis de factores de emisión utilizando mezcla al 10% de biodiésel obtenido por condiciones super críticas mas diésel comercial.....	53
Anexo 2.3 Análisis de factores de emisión utilizando mezcla al 10% de biodiésel obtenido catrálisis básica mas diésel comercial.....	55
Anexo 3 Ejemplo de cálculo de factores de emisión.....	57
Anexo 4 Eliminación de datos atípicos.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Motor de encendido por compresión.....	3
Figura 1.2. Diagrama p-v.....	3
Figura 1.3. Fases de un motor Diésel.....	4
Figura 1.4. Métodos de producción de biodiesel.....	7
Figura 1.5. Diagrama de flujo de la obtención del biodiesel en condiciones supercríticas.....	9
Figura 1.6. Diagrama de flujo de la obtención de biodiesel por catálisis.....	10
Figura 1.7 Composición de los gases de escape de motores a Diésel.....	13
Figura 1.8. Desglose del ciclo NEDC.....	20
Figura 2.1. Analizador de gases ON BOARD GLOBAL AXION R/S TM.....	22
Figura 2.2. Analizador de gases combinado para motores gasolina y diésel MET 6.3.....	23
Figura 2.3. Dinamómetro de chasis LPS3000.....	25
Figura 2.4. Consola de mando.....	25
Figura 2.5. Ventilador de aire refrigerante.....	26
Figura 2.6. Sistema de extracción de gases de escape.....	26
Figura 3.1. Ciclo de conducción programado en el dinamómetro de chasis.....	32
Figura 3.2. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible DP.....	33
Figura 3.3. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NO <sub>x</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible DP.....	33
Figura 3.4. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BSC10.....	34
Figura 3.5. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NO <sub>x</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BSC10.....	34
Figura 3.6. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BCB10.....	35
Figura 3.7. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NO <sub>x</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BCB10.....	35
Figura 3.8. Comportamiento del dióxido de carbono.....	36
Figura 3.9. Comportamiento del monóxido de carbono.....	37
Figura 3.10. Comportamiento de los hidrocarburos.....	38
Figura 3.11. Comportamiento de los óxidos de nitrógeno.....	38
Figura 3.12. Comportamiento del oxígeno.....	39
Figura 3.13. Comportamiento del material particulado.....	40
Figura 3.14. Rendimiento de combustible.....	40
Figura 3.15. Variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimiento de combustible.....	41

Figura 3.16. Variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimiento de motor del BCB10 respecto del BSC10 .....	41
Figura 3.17. Comportamiento del factor de emisión CO.....	42
Figura 3.18. Comportamiento del factor de emisión HC.....	43
Figura 3.19. Comportamiento del factor de emisión NOx.....	44
Figura 3.20. Variación porcentual de factores de emisión de BSC10 y BCB10 respecto de DP	44
Figura 3.21. Variación porcentual de factores de emisión de BCB10 respecto de BSC10	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Requisitos del diésel Premium .....	6
Tabla 1.2. Resultados de análisis de diésel y mezclas para las pruebas a desarrollar. .	8
Tabla 1.3. Diferencia entre los métodos de obtención de biodiesel.....	11
Tabla 1.4. Emisiones del biodiesel respecto al diésel convencional.....	15
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del Analizador de Gases ON BOARD GLOBAL AXION R/S TM.....	22
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del analizador de gases combinado MET 6.3.....	23
Tabla 2.3. especificaciones técnicas del dinamómetro de Chasis LPS3000.....	25
Tabla 2.4. Vehículo de pruebas .....	27
Tabla 3.1. Resultados promedio de las concentraciones de gases de escape.....	36
Tabla 3.2. Resultados de factores de emisiones utilizando mezclas BSC y BCB .....	42

## RESUMEN

El presente trabajo es parte del proyecto de investigación PIMI 15-10 “Estudio de la producción de biodiesel para el sector automotriz bajo condiciones supercríticas y evaluación de su desempeño mecánico y ambiental en motores de combustión interna encendidos por compresión”; y tiene por objeto evaluar las emisiones contaminantes durante el ciclo europeo NEDC (New European Drive Cycle) en un motor de combustión interna de encendido por compresión utilizando como combustibles mezclas de diésel Premium y biodiesel. El biodiesel utilizado fue producido por transesterificación básica y en condiciones supercríticas en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes – (LACBAL), y las pruebas del estudio se realizaron en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares – (CCICEV), laboratorios que pertenecen a la Escuela Politécnica Nacional. Se utilizaron tres combustibles: diésel Premium (DP), mezcla de diésel Premium con 10% de biodiesel de palma obtenido en condiciones supercríticas (BSC10), y mezcla de diésel Premium con 10% de biodiesel de palma obtenido por catálisis básica (BCB10). Se desarrolló una repetibilidad y reproducibilidad de cinco por cada combustible y como resultado de los ensayos realizados en un dinamómetro de chasis, se determinaron las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimientos de combustible que son los parámetros que permiten calcular factores de emisiones mediante la estimación con el modelo de combustión simplificado. Se utilizaron para la prueba diésel Premium y mezclas de diésel y biodiesel al 10%, teniendo 1 mezcla de diésel y biodiesel al 10% obtenido en condiciones supercríticas (BSC10), y 1 mezcla de diésel y biodiesel al 10% obtenido por catálisis básica (BCB10). Una vez realizadas las pruebas se pudo observar: la mezcla de BSC10 muestra que el CO, HC, PM disminuyen y existe un incremento en el contenido de CO<sub>2</sub>, mejorando la combustión y por tal razón se elevan los NO<sub>x</sub>.

**Palabras claves:** Biodiesel, NEDC, Transesterificación, Condiciones supercríticas, Emisiones contaminantes.

## ABSTRACT

The main project is a part of the PIMI 10 – 15 research project "Study of the production of biodiesel for the automotive sector under supercritical conditions and evaluation of its mechanical and environmental performance in internal combustion engines ignited by compression". The objective is to evaluate the polluting emissions generated while the vehicle is driving under the European Cycle NEDC (New European Drive Cycle) in a compression - ignition internal combustion engine using biodiesel fuel blends produced from palm oil by basic transesterification and in supercritical conditions. The biodiesel was produced by basic transesterification and under supercritical conditions in LACBAL (Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes), and the tests were carried out in the Technological Transfer Center for Training and Research in Vehicle Emissions Control – CCICEV; these laboratories belong to the Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador. Were used three fuels: Premium diesel (DP), Premium diesel blend with 10% palm biodiesel obtained under supercritical conditions (BSC10), and Premium diesel blend with 10% palm biodiesel obtained by basic catalysis (BCB10). The tests determined the concentrations of pollutant emissions and fuel consumption, which are the parameters that allow the calculation of emission factors by estimating with a mathematical model. The results showed that in the mixture of BSC10 under super critical conditions the CO, HC, PM decrease, and there is an increasing in the CO<sub>2</sub> content, improving the combustion; for this reason, the NO<sub>x</sub> increased too.

**Keywords:** Biodiesel, NEDC, Transesterification, Supercritical conditions, polluting emissions.

# **EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIONES DURANTE EL CICLO EUROPEO NEDC EN UN MCIA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZANDO MEZCLAS DE COMBUSTIBLES DIÉSEL PREMIUM Y BIODIESEL, PRODUCIDO POR TRANSESTERIFICACIÓN BÁSICA Y EN CONDICIONES SUPERCRÍTICAS**

## **INTRODUCCIÓN**

La Escuela Politécnica Nacional (EPN) como un referente de ciencia, tecnología e investigación y apoyados en sus laboratorios, investiga de manera general problemas de la sociedad y de manera particular problemas de emisiones contaminantes a través del Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares – CCICEV.

El parque vehicular equipado con motores de encendido por compresión que circulan en el Distrito Metropolitano de Quito emiten emisiones contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), y también material particulado, lo que genera una problemática de salud pública ambiental a la ciudadanía. Debido a esto entidades como la Agencia Nacional de Tránsito han emitido resoluciones como la No. 063-DIR-2017-ANT que indica la obligatoriedad de realizar los controles a todos los vehículos automotores a nivel nacional por temas de seguridad y emisiones contaminantes a través de los centros de revisión técnica vehicular[1]; y cuyo plazo de aplicación vence el primer semestre del año 2019.

Para enfrentar esta problemática existen potenciales soluciones y la Escuela Politécnica Nacional lleva adelante una serie de proyectos de investigación dentro de los cuales se enmarca el proyecto PIMI 15-10 que a través del presente trabajo plantea evaluar el uso de mezclas de diésel con biocombustibles en un motor de combustión interna (MCIA) de encendido por compresión.

De esta forma se podrá evidenciar las ventajas y desventajas del uso de biocombustibles respecto de su proceso de transesterificación, sea este por catálisis o condiciones supercríticas, se podrán evaluar las emisiones contaminantes correspondientes a los combustibles según su proceso de obtención; y, el beneficio medioambiental en la reducción efectiva de emisiones contaminantes de CO, HC, NOx y material particulado (PM), en el proceso de combustión con el uso de mezclas de biodiesel.

Respecto de los contaminantes, algunos estudios indican que las emisiones de NOx se incrementan debido a una mayor temperatura de combustión y mayor nivel de oxígeno



contenido en el combustible, pero también se debe a los ácidos grasos insaturados propios de la obtención del biocombustible[2], la reducción de material particulado se evidencia también con el uso de biocombustibles en motores que no están equipados con dispositivos de postratamiento[3].

El parque automotor diésel en el país está sujeto al cumplimiento de los niveles de emisiones contaminantes acorde a la NTE INEN 2207:2002[4], y dentro de este contexto con el presente trabajo apoyado en la capacidad técnica de los laboratorios del CCICEV pretende evaluar las emisiones contaminantes que emiten los motores de combustión interna diésel, utilizando combustibles y mezclas de combustible diésel bajo parámetros aplicables a nuestra realidad nacional por medio del ciclo dinámico europeo NEDC (New European Drive Cycle).

## **Objetivo General**

Evaluar los factores de emisiones durante el ciclo europeo NEDC (New European Drive Cycle) en un motor de combustión interna de encendido por compresión utilizando como combustibles mezclas de diésel Premium y biodiesel, producido por transesterificación básica y en condiciones supercríticas.

## **Objetivos específicos**

- Determinar las concentraciones de emisiones CO [%V], CO<sub>2</sub>[%V], O<sub>2</sub> [%V], HC [ppm] y NO<sub>x</sub> [ppm] utilizando el ciclo de conducción NEDC con combustibles diésel comercial, biodiesel obtenido por transesterificación y biodiesel obtenido en condiciones supercríticas.
- Utilizar el modelo matemático simplificado de la combustión para determinar los factores de emisión: CO [g/km], HC [g/km] y NO<sub>x</sub> [g/km] para el ciclo NEDC.
- Determinar el rendimiento de motor para cada combustible de prueba [km/gl].
- Evaluar el comportamiento térmico de los gases de combustión en el sistema de escape.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Motor de Encendido por Compresión

Los motores de encendido por compresión inician su proceso mediante el autoencendido de la mezcla de combustible cuando se consigue a elevadas temperaturas y presiones en la cámara de combustión, de esta manera transforma la energía calórica del combustible en energía mecánica.



Figura 1.1. Motor de encendido por compresión.

(Fuente: <http://www.revistadelmotor.es/2016/02/17/mercedes-benz-clase-e-220-d.html>)

### 1.1.1. Ciclo Diésel

El ciclo ideal indica el comportamiento de un motor encendido por compresión, se lo representa mediante el diagrama  $p - v$  (presión - volumen), como se muestra en la Figura 1.2 Diagrama  $p-v$

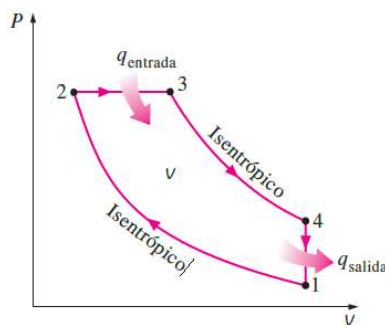


Figura 1.2. Diagrama  $p-v$ .

(Fuente: Y. A. C. Y. M. A. BOLES, TERMODINÁMICA, MÉXICO: McGraw-Hill Interamericana, 2006)

Los procesos termodinámicos teóricos del ciclo diésel son:

- **1-2** *Compresión isentrópica*
- **2-3** *Adición de calor a presión constante*
- **3-4** *Expansión isentrópica*
- **4-1** *Rechazo de calor a volumen constante*

### 1.1.2. Principio de funcionamiento

El ciclo de trabajo de los motores de cuatro tiempos se completa en dos vueltas de cigüeñal permitiendo cuatro carreras del pistón.

Los cuatro tiempos del motor son Admisión, Compresión, Expansión, Escape.

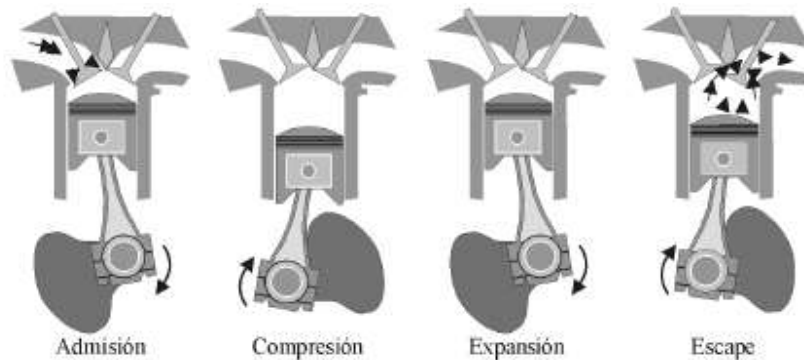


Figura 1.3. Fases de un motor Diésel.

(Fuente: F. P. Y. J. DESANTES, MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVAS, BARCELONA: REVERTÉ S.A., 2011)

**Fase de admisión (1ra carrera).** - El pistón en el punto muerto superior (PMS), la válvula de admisión se abre y la de escape se mantiene cerrada, este a su vez se desplaza hasta el punto muerto inferior (PMI) creando una pequeña depresión que permite el ingreso de aire al motor, cuando el pistón llega al PMI las válvulas de admisión se cierra y comienza la siguiente fase.

**Fase de compresión (2da carrera).** - Con las válvulas de admisión y escape cerradas el pistón asciende desde el punto PMI hacia el PMS, comprimiendo el aire, en las cercanías del pistón al PMS se inyecta combustible produciendo la combustión.

**Fase de expansión (3ra carrera).** - la combustión, es la fase donde se produce un aumento de presión empujando el pistón desde el PMS hacia el PMI, esta carrera es la única que realiza trabajo.

**Fase de escape (4ta carrera).** - el pistón se desplaza desde el PMI hacia el PMS para expulsar los gases quemados mediante la abertura de la válvula de escape. Cuando el pistón llega la PMS se cierra la válvula de escape y se inicia el nuevo ciclo.

En un proceso real, debido a la compresibilidad del aire y que la combustión no puede producirse a presión constante, es necesario realizar cambios sobre los momentos de

apertura y cierre de válvulas y el instante de inyección de combustible, por lo que no coincide con los PMS y PMI, sino que se produce adelantos y retrasos a estos puntos.[5]

## **1.2. Proyecto PIMI 15-10**

El proyecto PIMI 15-10 es el “Estudio de la producción de biodiesel para el sector automotriz bajo condiciones supercríticas y evaluación de su desempeño mecánico y ambiental en motores de combustión interna encendidos por compresión.”

Este proyecto estudiará la producción de biodiesel de acuerdo con el proceso de transesterificación (conversión de aceites en ésteres – biodiesel) en condiciones de alta presión y temperaturas que permitan alcanzar las condiciones súper – críticas del alcohol con el fin de disminuir drásticamente los tiempos de la reacción y eliminar el uso de catalizadores.

Además, se evaluará el comportamiento del uso del biocombustible en los motores diésel, considerando las prestaciones como potencia, torque, consumo de combustible y emisiones contaminantes.[6]

## **1.3. Combustibles: Diésel, Biodiesel**

Los combustibles son sustancias capaces de reaccionar exotérmicamente con el oxígeno, transformando la energía asociada a su estructura molecular en energía térmica. La facilidad del combustible para ser almacenado en condiciones ambientales y su gran densidad energética confiere al motor una gran autonomía y su sistema de alimentación una relativa sencillez. Estas ventajas son las que permiten que estos combustibles procedentes del petróleo sean los más usados en el sector automotriz.

### **1.3.1. Diésel Premium**

El Diésel es una mezcla compleja de hidrocarburos que se obtiene del petróleo crudo mediante el proceso de destilación fraccionada en un punto de ebullición entre 250 a 350°C.

Este es una mezcla compleja de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos. El número de carbonos que lo forman se encuentran entre 10 y 22 aproximadamente, debido a que no es un producto manufacturado su composición no es exacta[7].

Las propiedades del diésel influyen para el funcionamiento y fiabilidad del motor, también en la cantidad de emisiones contaminantes emitidas a la atmosfera.

Una de las características fundamentales es la densidad de  $832 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$  y su poder calórico inferior es de  $43,1 \left(\frac{MJ}{kg}\right)$ , dependiendo de su composición.[8]

Los requisitos del diésel Premium comercializado en el Ecuador se muestran en la Tabla 1.1; mismos que están en base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012 7R.

Tabla 1.1. Requisitos del diésel Premium

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Métodos de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 PROCEDIMIENTO A
Contenido de agua y sedimentación	%	-	0.05	NTE INEN 1494
Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0.15	NTE INEN 1491
Contenido de ceniza	%	-	0.01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática al 40%	$mm^2/s$	2.0	5.0	NTE INEN 810
Contenido de azufre	% peso (ppm)	-	0.05 - 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 biodiesel	%	5	10	NTE INEN 14078

(Fuente Norma Técnico Ecuatoriano, 2012)

### 1.3.2. Biodiesel

Es un combustible producido a partir de materias de base renovables, como los aceites vegetales y que se pueden usar en los motores diésel, químicamente constituyen ésteres de alquilo, de metilo y de etilo, con cadenas largas de ácidos grasos, estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión mucho más limpia.

Este combustible puede utilizarse puro (B100), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diésel de petróleo[9].

Según la ASTM (America Society for Testing and Material Standart) describe al biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos tales como aceites vegetales o grasas animales, y que se pueden emplear en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo coste y a sus ventajas químicas y físicas

#### 1.3.2.1. Proceso de obtención

La producción del biodiesel puede ser por proceso catalítico o no catalítico, en el caso del proceso catalítico el biodiesel se produce por la reacción del aceite vegetal con etanol o metanol (alcohol), en presencia de un catalizador como NaOH o KOH, resultado de esto se obtiene ésteres (biodiesel) y glicerol, este proceso se conoce como transesterificación.[10]

Es una reacción de un alcohol con aceites (triglicéridos), para formar ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga y glicerina[11], para lograr el proceso de transesterificación se pueden utilizar procesos catalíticos y no catalíticos, teniendo algunas clasificaciones como se muestra a continuación.

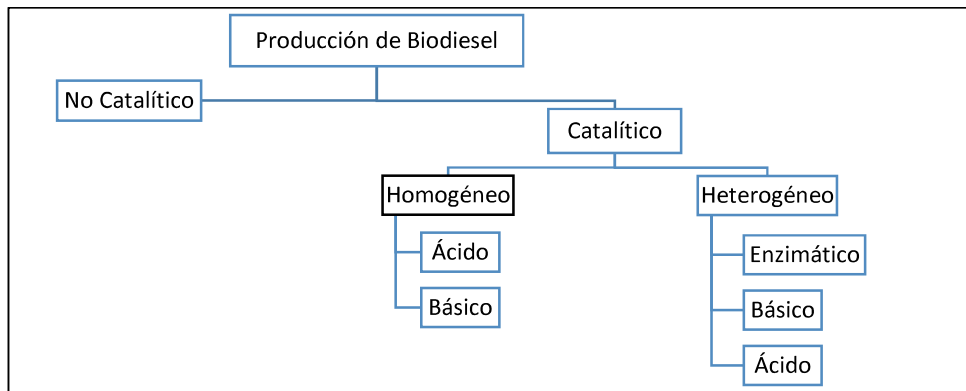


Figura 1.4. Métodos de producción de biodiesel.  
(Fuente: Aminul Islam, Y. H. T.-Y., Eng-Seng Chan. (2014). Advances in solid-catalytic and non-catalytic)

Además, estas cadenas no contienen azufre, el cual es considerado un contaminante medioambiental. Por otro lado, la glicerina, luego de su purificación puede ser utilizada, entre múltiples usos, en la industria farmacéutica y cosmética, donde cuenta con una gran demanda.

Puede usarse como materia prima tanto aceites puros (biocombustibles de primera generación) y aceites vegetales residuales (biocombustibles de segunda generación).

Para el segundo caso, la presencia de residuos impone se filtre este aceite antes de proceder a la transesterificación.

Tabla 1.2. Resultados de análisis de diésel y mezclas para las pruebas a desarrollar.

Requisito	DIESEL	BSC10	BCB10	BSC100	BCB100
Peso molecular g/mol	211,7	216,76	222,45	275,43	281,64
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	835	839	841	867	870
Punto de inflamación °C	68	71	70	166	165
Agua y sedimentos %	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Viscosidad cinemática a 40 °C mm <sup>2</sup> /s	3,27	3,53	3,71	6,2	6,9
Contenido de azufre mg/kg	92,05	81,4	82,25	17,26	18,11
Corrosión a la lámina de cobre Clasificación	1A	1A	1A	1A	1A
Índice de acidez mg KOH/g	0,0023	0,0052	0,0058	0,0423	0,0691
Poder calórico MJ/kg	38,80	38,00	36,93	33,99	31,16
Contenido de cenizas %	0,058	0,041	0,048	0,01	0,01
Contenido de carbón %	0,12	0,07	0,09	-	-
Índice de cetano	53,1	54,1	53,8	-	-

(Fuente: LACBAL - Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes de la Facultad de Ingeniería Química Escuela Politécnica Nacional)

### 1.3.3. Producción de biodiesel en condiciones supercríticas.

Esta producción también se conoce como transesterificación supercrítica no catalítica, la cual utilizando como base triglicéridos produce biodiesel; no se utilizan catalizadores y la producción es relativamente alta en comparación con el método tradicional de obtención por catálisis básica; consiste en alcanzar etapas supercríticas en alcoholes, pudiendo utilizarse metanol, etanol, propanol y butanol[12], las temperaturas de reacción supercríticas son altas y favorecen al rendimiento de FAME (Fatty Acid Methyl Ester) o FAES (Fatty Acid Ethyl Ester), existe una mayor eficiencia con una menor cantidad de

pasos para el procesamiento, este proceso es más tolerante a la presencia de agua y FFA (Free Fatty Acids)[13].

Los rangos de temperatura y presión son 300 °C a 400 °C y 10 MPa a 30 MPa, con lo que el alcohol y el aceite forman una sola fase y la velocidad de reacción aumenta significativamente[11].

La reacción de transesterificación de los triglicéridos del aceite de palma por condiciones supercríticas se describe de manera sencilla a continuación.

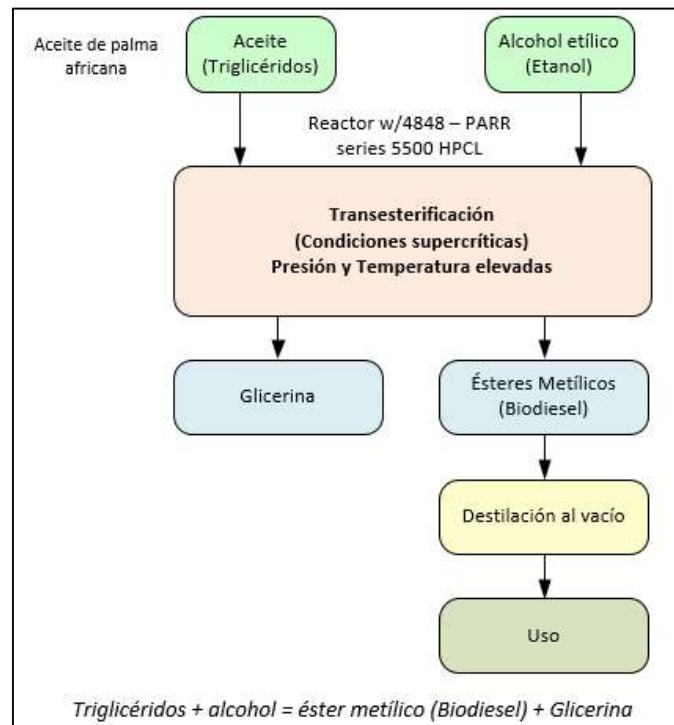


Figura 1.5. Diagrama de flujo de la obtención del biodiesel en condiciones supercríticas (Fuente: Propia)

### **Ventajas y desventajas del proceso de obtención bajo condiciones supercríticas[13].**

Dentro de las ventajas de este proceso se tienen:

- No requiere catalizadores.
- Alta conversión de reactivos a productos
- No genera desechos.
- Menor número de pasos en el proceso.
- No requiere una neutralización ácida, lavado y secado.
- Tiempo de producción bajo.



- Proceso adecuado para materias primas de baja calidad.

Dentro de las desventajas de este proceso se tienen:

- Condiciones energéticas de operación elevadas: alta temperatura y presión, relación de alcohol y aceite.
- El desafío es mayor para empujar este proceso a escala industrial.

### 1.3.4. Producción de biodiesel por catálisis.

Este proceso es utilizado en la producción de biodiesel utilizando catalizadores para facilitar la reacción de transesterificación, pudiendo ser estos óxidos e hidróxidos de metales alcalinos térreos, hidróxidos de metales alcalinos o sales[11], este proceso es económico y eficiente, más simple que el proceso de obtención por condiciones supercríticas, el proceso consiste en realizar la transesterificación a través de la mezcla de aceite (triglicéridos) con un alcohol y con la ayuda de un catalizador para facilitar la reacción, misma que es consecutiva reversible.

La figura a continuación muestra el proceso convencional de producción de biodiesel a partir de aceite (triglicéridos).

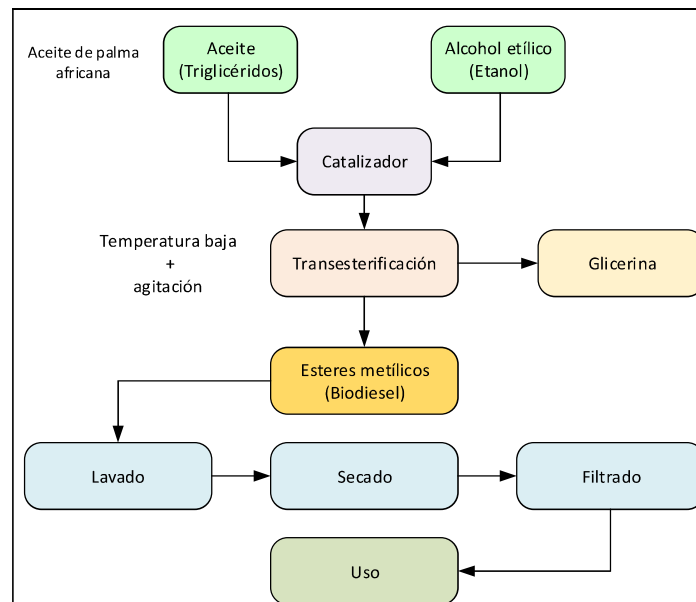


Figura 1.6. Diagrama de flujo de la obtención de biodiesel por catálisis (Fuente: Propia)

### 1.3.5. Comparación entre el método tradicional de transesterificación y el proceso de obtención en condiciones supercríticas.

La siguiente tabla muestra una comparación entre los métodos utilizados para la obtención del biodiesel por el método tradicional y bajo condiciones supercríticas.

Tabla 1.3. Diferencia entre los métodos de obtención de biodiesel

	<b>Método catalítico</b>	<b>Método de condiciones supercríticas</b>
<b>Tiempo de reacción</b>	1,6 horas	4 minutos
<b>Presión de reacción, temperatura</b>	0,1 Mpa a 338K	8,4 Mpa a 593K
<b>Catalizador</b>	NaOH, KOH	Ninguno
<b>Efectos de la presencia de ácidos grasos libres</b>	Productos jabonosos con problemas de separación	Sin problemas de separación
<b>Rendimiento</b>	98%	100%
<b>Necesidad de purificación</b>	Complicada	Simple

(Fuente: S. Hawash, N. K., F. Zaher, O. Kenawi, G. El Diwani. (2008). Biodiesel fuel from Jatropha oil via non-catalytic supercritical methanol transesterification. *Fuel*)

## 1.4. La Combustión

En los motores de combustión interna los procesos de combustión son impredecibles para poder cuantificar el máximo aprovechamiento de la energía contenida en la mezcla aire / combustible porque las reacciones químicas que suceden dentro de la cámara de combustión no son del todo completas debido a problemas inherentes de misma combustión, como, disociación, falta de equilibrio químico, formación de especies intermedias debido a reacciones parciales de oxidación.

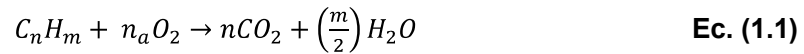
Sin embargo, es necesario evaluar de la forma más precisa posible el aprovechamiento real que se obtiene en el proceso de combustión.

### 1.4.1. Estequiometría de la combustión

Es el cálculo de la relación cuantitativa entre los reactantes (aire / combustible) y los productos de la combustión, en base a la conservación de masa de las especies química que intervienen en la reacción.

En un proceso de combustión ideal, si existe suficiente cantidad de oxígeno, el carbono y el hidrocarburo que componen el combustible son completamente oxidados en dióxido de carbono y agua.

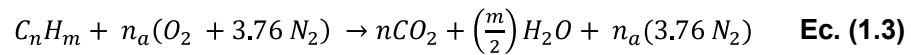
La reacción de equilibrio de un mol de  $C_nH_m$  con  $n_a$  moles  $O_2$  se expresa en la ecuación (1.1)



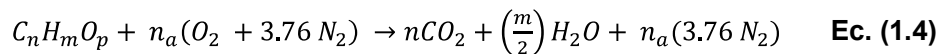
Donde el número de moles de oxígeno necesarios para oxidar completamente el combustible se puede calcular como:

$$n_a \rightarrow n + \frac{m}{4} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Se toma en cuenta que el oxígeno utilizado es el que se encuentra en el aire atmosférico a condiciones secas en términos molares.



La ecuación (1.3) define la proporción exacta entre el aire y el combustible que es necesaria teóricamente. La ecuación general es la siguiente.



Donde:  $n_a = \left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}\right)$

Para obtener la relación estequiométrica es necesario multiplicar cada termino por sus respectivos pesos moleculares  $PM_i$ .

La relación entre la masa del combustible y el aire necesario para oxidarlo se conoce como dosado estequiométrico. [5]

$$F_e = \left(\frac{m_f}{m_a}\right)_2 = \left(\frac{nPM_c + mPM_H + pPM_o}{\left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}\right)(PM_{O_2} + 3.76PM_{N_2})}\right) \quad \text{Ec. (1.5)}$$

## 1.5. Emisiones Contaminantes

En los procesos de combustión los contaminantes importantes que se derivan son los hidrocarburos ( $HC$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), óxido de azufre ( $SO_x$ ), dióxido de azufre ( $CO_2$ ) y material particulado ( $PM$ ).

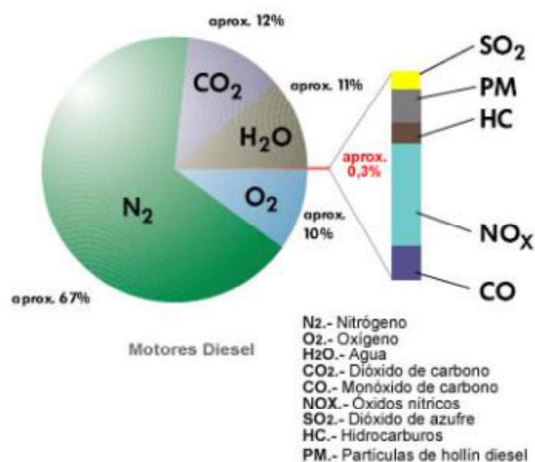


Figura 1.7 Composición de los gases de escape de motores a Diésel  
 (Fuente: <https://didacforner.net/la-quimica-de-los-motores-diesel-y-el-escandalo-volkswagen/>)

Existe cuatro efectos principales a causa de estas contaminaciones: alteración de las propiedades atmosféricas y las precipitaciones, daños en la vegetación, deterioro de los materiales y potencial incremento de las enfermedades y mortalidad de los humanos.

### 1.5.1. Clasificación de las emisiones

Los gases generados por el proceso de combustión de los motores Diésel son:

- Inofensivas

Los contaminantes son: Nitrógeno ( $N_2$ ), Oxígeno ( $O_2$ ), Agua ( $H_2O$ ), *Dióxido de Carbono* ( $CO_2$ )

- Tóxicas

Los contaminantes son: Monóxido de carbono ( $CO$ ), Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), Hidrocarburos ( $HC$ ), Material Particulado  $PM$ , Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ).

El  $CO$  es un gas venenoso que en pequeña cantidades puede causar mareos, dolor de cabeza y en grandes cantidades puede reemplazar al oxígeno en el cuerpo causar la muerte.

Los  $NO_x$  son uno de los principales responsables de la lluvia ácida y potencialmente productores del smog fotoquímico, el ( $NO$ ) causa daños en el ozono en la estratosfera

facilitando así el paso de la radiación solar ultravioleta hasta la superficie terrestre, el  $NO_2$  de olor penetrante y color marrón rojizo, pueden irritar los pulmones y reducir su resistencia a enfermedades infecciosas.

El HC causa efectos sobre la salud humana como irritación al sistema respiratorio, ojos, también tiene carácter cancerígeno. Mucho más importante es su potencial formación de ozono ( $O_3$ ) cuando es expuesto a la luz solar y reacciona con los óxidos de nitrógeno, además forma otros compuestos altamente oxidantes en capas bajas de la atmosfera como es el smog fotoquímico.

El  $PM$  es el responsable de enfermedades infecciosas en el sistema respiratorio, alcanzado incluso a los pulmones y a las corrientes sanguíneas, también, es importante mencionar el  $SO_2$  que es responsable de la lluvia acida

### **1.5.2. Emisiones Biodiesel**

Las emisión de biodiesel tiene un comportamiento que depende de las mezclas utilizadas ( $B100, B50, B20, B10, B5$ ) y de las condiciones operativas del vehículo, a continuación se detalla el comportamiento de las emisiones y el desempeño del vehículo según algunos autores.

- El biodiesel utilizado en motores diésel puede reducir las emisiones de  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HC$ ,  $PM$ , hidrocarburos aromáticos policíclicos  $PHA$  y compuestos orgánicos  $VOC$ . [14]

Las emisiones de  $NO_x$  aumentan linealmente a medida que aumenta la concentración de biodiesel, y lo contrario pasa con la emisiones de  $CO$ ,  $HC$  y  $PM$  disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de mezcla de biodiesel. Esta disminución es debido a la presencia de oxígeno en la estructura molecular en el biodiesel.[15]

- El biodiesel es ecológico, ya que no produce  $SO_x$  y no aumenta las emisiones de  $CO_2$ . [16]
- El incremento o la disminución del  $NO_x$  no está determinado por el cambio de una sola propiedad del combustible (densidad, numero de cetano, poder calórico y viscosidad), si no es el resultado de una serie de mecanismos de formación, que dependen de la combustión específica, las condiciones de operación del motor y la tecnología utilizada. [17]
- Las emisiones de  $NO_x$  y opacidad de humos, operando con biodiesel de palma y diésel, muestra que con biodiesel operando en un motor a condiciones de plena

carga y bajos regímenes de giro incrementaron los  $NO_x$  en torno a un 20%. Bajo las mismas condiciones de carga y altas velocidades del motor se obtuvo una disminución de los  $NO_x$  del 6%, mientras que a carga parcial siempre se obtuvieron incrementos de  $NO_x$  al usar biodiesel, las emisiones de  $NO_x$  disminuyeron o aumentaron dependiendo del modo operación del motor.[17]

Además, el uso del biodiesel en los motores de encendido por compresión muestra una reducción de potencia y un aumento en el consumo de combustible.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de resultados cuando se usa biodiesel.

Tabla 1.4. Emisiones del biodiesel respecto al diésel convencional

Tipo de Emisión	B100 (%)	B20(%)
Hidrocarburos totales sin quemar	-93	-30
Monóxido de carbono	-30	-22
Partículas en suspensión	-30	-22
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrogenados (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de ozono	-50	-10
Óxidos de nitrógeno	+30	+2

(Fuente: José Stratta, BIOCMBUSTIBLES: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel)

## 1.6. Control De Emisiones Contaminantes

La disminución de emisiones contaminantes en los motores de combustión interna se puede efectuar de la siguiente manera:

- Soluciones activas que afectan al diseño del motor y sus componentes.
- Soluciones pasivas que reducen las emisiones a la salida del motor denominadas sistemas de postratamiento de gases de escape.

Los emisiones contaminantes características de motores de encendido por compresión son los  $NO_x$  y  $PM$ , por ello se indican las tecnologías que permiten disminuir estas emisiones.[5]

### 1.6.1. Soluciones Activas

- Cámara de Combustión

- Sistema de inyección
- Recirculación de gases de Escape
- Enfriamiento del aire de admisión

### 1.6.2. Soluciones Pasivas

- Reducción catalítica selectiva SCR
- Sistemas de Almacenamiento y reducción de  $NO_x$  (NSR o LNT)
- Filtros de Partículas Diésel DPF
- Catalizador de Oxidación Diésel (DOC)

## 1.7. Factores De Emisión

El factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. En el caso de vehículos automotores, los factores de emisión se expresan en unidades de contaminante por distancia recorrida, ejemplo  $\left(\frac{gr}{km}\right)$ .

### 1.7.1. Modelo simplificado de la combustión

El modelo simplificado de combustión representa la conversión de la mezcla aire – combustible en sus principales productos.

Con el conocimiento del peso molecular y la densidad del combustible utilizado es posible calcular la cantidad de  $CO$ ,  $HC$  y  $NO_x$  emitidos por unidad de combustible quemado, esto se representa en gramos de contaminante por kilómetro recorrido, para lo cual es necesario introducir el consumo de combustible promedio del vehículo de prueba.

Para obtener a la composición de los productos de combustión, se asume lo siguientes puntos:

- Completo consumo de combustible
- Se ignora la oxidación de nitrógeno del aire que ingresa a la combustión
- El carbono liberado del combustible se emite como  $CO_2$ ,  $CO$  o como hidrocarburo no quemado equivalente al propano ( $C_3H_6$ ).
- Los cálculos de combustión se basan en cantidades estequiométricas de aire.
- Se considera adicional como productos de combustión al  $C_3$  y  $NO$ .

Con estos supuestos, se puede decir que el peso molecular del combustible está dado por la fórmula molecular equivalente  $CH_y$  de la cual se tiene:

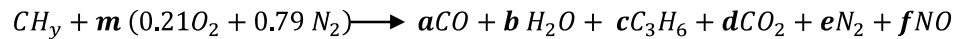
$$Y = \left( \frac{\% \text{ peso H}}{\% \text{ peso C}} \right) \left( \frac{MW_C}{MW_H} \right) \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Donde:

$MW_C$ : Peso molecular del carbono

$MW_H$ : Peso molecular de hidrogeno

El balance de masa para la combustión, despreciando el exceso de oxígeno, está dado por:



**Ec. (1.7)**

Donde las variables a, b, c, d, e, f, y m son coeficientes estequiométricos desconocidos y definidos como:

**m** = moles de aire consumido por mol de combustible consumido

**a** = moles formados de  $CO$  por mol de combustible consumido

**b** = moles formados de  $H_2O$  por mol de combustible consumido

**c** = moles formados de  $C_3H_6$  por mol de combustible consumido

**d** = moles formados de  $CO_2$  por mol de combustible consumido

**e** = moles formados de  $N_2$  por mol de combustible consumido

**f** = moles formados de  $NO$  por mol de combustible consumido

Las ecuaciones de balance de masa se pueden escribir como:

<b>Elementos</b>	<b>Reactantes</b>		<b>Productos</b>	
Carbono	1	=	$a + 3c + d$	<b>Ec. (1.8)</b>

Hidrógeno	$y$	=	$2b + 6c$	<b>Ec. (1.9)</b>
-----------	-----	---	-----------	------------------

Oxigeno	$0.42 m$	=	$a + b + 2d + f$	<b>Ec. (1.10)</b>
---------	----------	---	------------------	-------------------

Nitrógeno	$1,08 m$	=	$2e + f$	<b>Ec. (1.11)</b>
-----------	----------	---	----------	-------------------



Para resolver el sistema de ecuaciones, se realiza la medición de gases (concentraciones volumétricas) en pruebas dinámicas para obtener datos adicionales que permitan determinar las incógnitas:

$$R_{CO} = \frac{CO}{CO_2} = \frac{a}{d} \quad \text{Ec. (1.12)}$$

$$R_{HC} = \frac{HC}{CO_2} = \frac{c}{d} \quad \text{Ec. (1.13)}$$

$$R_{NO} = \frac{NO}{CO_2} = \frac{f}{d} \quad \text{Ec. (1.14)}$$

Donde:

$R_{CO}$ ,  $R_{HC}$ ,  $R_{NO}$  son las razones de %CO a %CO<sub>2</sub>; HC% a %CO<sub>2</sub>, %NO a %CO<sub>2</sub>, respectivamente, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$a = R_{CO}d \quad \text{Ec. (1.15)}$$

$$c = R_{HC}d \quad \text{Ec. (1.16)}$$

Reemplazando estas relaciones en la ecuación Ec. (1.8) se obtiene:

$$d = \frac{R_{CO}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} \quad \text{Ec. (1.17)}$$

Con los valores de a, c, y f se puede obtener los factores de emisión ( $EF'$ ) en gramos de contaminante por gramo de combustible consumido:

$$EF'_{CO} = a * \frac{MW_{CO}}{MW_{fuel}} = \frac{R_{CO}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{CO}}{MW_{fuel}} \quad \text{Ec. (1.18)}$$

$$EF'_{HC} = c * \frac{MW_{HC}}{MW_{fuel}} = \frac{R_{HC}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{HC}}{MW_{fuel}} \quad \text{Ec. (1.19)}$$

$$EF'_{NO} = f * \frac{MW_{NO}}{MW_{fuel}} = \frac{R_{NO}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{NO}}{MW_{fuel}} \quad \text{Ec. (1.20)}$$

El peso molecular del combustible se determina para C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>:

$$MW_{Fuel} = \frac{12 \text{ g C}}{\text{mol C}} * \left( \frac{1 \text{ mol}}{\text{mol fuel}} \right) + \frac{1 \text{ g H}}{\text{mol H}} * \left( \frac{2,167 \text{ mol}}{\text{mol fuel}} \right) = 14,167 \frac{\text{g fuel}}{\text{mol fuel}}$$

$$MW_{Fuel} = 14,167 \frac{\text{g Fuel}}{\text{mol Fuel}} \rightarrow 0,014167 \frac{\text{kg fuel}}{\text{mol comb}}$$

Finalmente introduciendo la densidad del combustible  $\delta_f \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$  y el consumo de combustible por distancia recorrida  $FC \left(\frac{m^3}{Kg}\right)$ , se puede obtener el factor de emisión en gramos de cada contaminante por kilómetro recorrido.

$$EF = EF' * \delta_{fuel} * FC \quad \text{Ec. (1.21)}$$

$$EF_{CO} = \frac{g_{CO}}{km} = \frac{28 \frac{\%CO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} + 1} * \delta_{fuel} * \frac{FC}{0.014167} \quad \text{Ec. (1.22)}$$

$$EF_{CO} = \frac{g_{HC}}{km} = \frac{28 \frac{\%HC}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} + 1} * \delta_{fuel} * \frac{FC}{0.014167} \quad \text{Ec. (1.23)}$$

$$EF_{CO} = \frac{g_{NO}}{km} = \frac{28 \frac{\%NO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} + 1} * \delta_{fuel} * \frac{FC}{0.014167} \quad \text{Ec. (1.24)}$$

## 1.8. Ciclo de conducción

El ciclo utilizado para las pruebas es el ciclo Europeo NEDC (New European Drive Cycle)[18], mismo que debe ejecutarse de manera previa al ensayo para regular los mandos de acelerador y freno; y de esta forma se aproxime al ciclo teórico dentro de los límites establecidos.

Consta de dos partes ciclo urbano y ciclo no urbano, donde para el ciclo urbano se utilizará primera, segunda y tercera marcha y para el ciclo no urbano se utilizará segunda, tercera, cuarta y quinta marcha.

Si el vehículo no alcanza la velocidad establecida para el ciclo debe acelerarse a fondo y registrar las desviaciones correspondientes.

La tolerancia de desviación para este ciclo es de  $\pm 2$  km/h entre la velocidad indicada y la velocidad teórica en aceleración, velocidad constante y desaceleración.

El ciclo se desglosa como se observa en la figura a continuación.

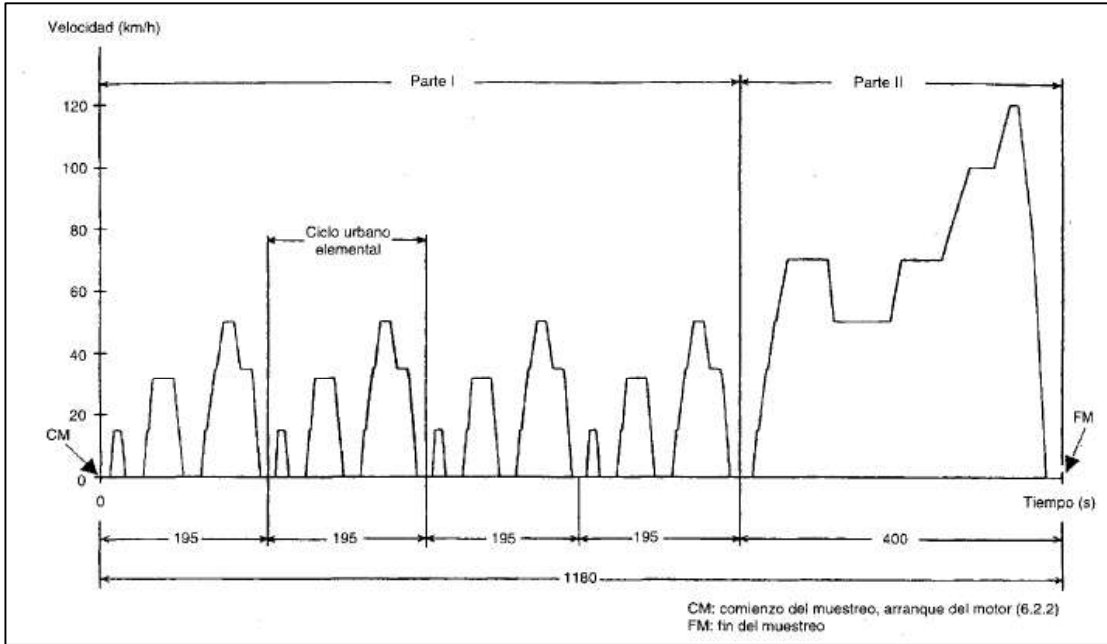


Figura 1.8. Desglose del ciclo NEDC

(Fuente: Reglamento no 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE): Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos por lo que respecta a la emisión de contaminantes según las necesidades del motor en materia de combustible [2015/1038] 2015)

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Equipos utilizados en la ejecución de ensayos**

Los equipos a utilizarse son los indicados para los ensayos de determinación de factores de emisiones, rendimiento de motor y determinación de temperatura de gases de escape; estos equipos se encuentran en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares – CCICEV, parte de la Escuela Politécnica Nacional y son:

- ✓ Analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM.
- ✓ Analizador de gases combinado para gasolina/diésel MET 6.3.
- ✓ Dinamómetro de chasis LPS3000.
- ✓ Tanque externo de combustible.
- ✓ Sistema de adquisición de datos de temperatura con placa Arduino y termocuplas.

#### **2.1.1. Analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM**

Este equipo permite medir las concentraciones de emisiones contaminantes en vehículos equipados con motor diésel o gasolina, durante las condiciones reales de conducción ya sea en carretera o en un ciclo de conducción en un dinamómetro de chasis dentro de un laboratorio; permite medir las concentraciones en volumen de monóxido de carbono [CO en %V], dióxido de carbono [CO<sub>2</sub> en %V], oxígeno [O<sub>2</sub> en %V] hidrocarburos [HC en ppm] y óxidos de nitrógeno [NOx en ppm], sus componentes principales son:

- ✓ 2 cámaras NDIR, sensores de infrarrojo no dispersivo que evalúan CO, CO<sub>2</sub> y HC.
- ✓ 4 sensores de detección electroquímica que evalúan NOx y O<sub>2</sub>
- ✓ Sistema neumático para absorción de gas
- ✓ Sonda de gases de escape
- ✓ Interfaz de adquisición de datos a través de un computador portátil
- ✓ Sistema de filtrado de impurezas

El equipo analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM se observa en la Figura 2.1 y las especificaciones técnicas del mismo se evidencian en la Tabla 2.1.



Figura 2.1. Analizador de gases ON BOARD GLOBAL AXION R/S TM  
(Fuente: Autores, 2018)

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del Analizador de Gases ON BOARD GLOBAL AXION R/S TM

Detalle	Valor
Principio de medición (HC,CO,CO <sub>2</sub> )	Espectrometría de infrarrojo NDIR (Non Dispersive Infrared Detector)
Principio de medición (O <sub>2</sub> ,NO <sub>x</sub> )	Detección electroquímica
Tensión de Alimentación	12-24 V DC / 5-8 A
Índice de flujo	5 l / min
O <sub>2</sub> -Rango de medición / Precisión / Resolución	0.00 – 25.00 % / ±0.1% abs. or ±3% rel. / 0.01 Vol. %
CO-Rango de medición / Precisión / Resolución	0.00 – 10.00 % / ±0.02% abs. or ±3% rel. / 0.001 Vol. %
NO <sub>x</sub> -Rango de medición / Precisión / Resolución	0-4000 (ppm) / ±25 ppm abs. or ±4% rel. / 1 ppm
CO <sub>2</sub> -Rango de medición / Precisión / Resolución	0.00 – 16.00 % / ±0.3% abs. or ±3% rel. / 0.01 Vol. %
HC(Propano)-Rango de medición / Precisión / Resolución	0 - 4000 ppm / ±8 ppm abs. or ±3% rel. / 1 ppm

(Fuente: Enterprise, G. M. The world's first Micro PEMS, a truly portable system with remote monitoring capabilities. In)

### 2.1.2. Analizador de gases combinado para gasolina/diésel MET 6.3

Este equipo permite medir las concentraciones de emisiones contaminantes en - vehículos equipados con motor diésel o gasolina, durante las condiciones reales de conducción ya sea en carretera o en un ciclo de conducción en un dinamómetro de chasis dentro de un laboratorio; permite medir las concentraciones en volumen de monóxido de carbono [CO en %V], dióxido de carbono [CO<sub>2</sub> en %V], oxígeno [O<sub>2</sub> en %V] hidrocarburos [HC en ppm], óxidos de nitrógeno [NO<sub>x</sub> en ppm], con cálculo de valor lambda, opacidad [porcentaje y valor k] y material particulado [mg/m<sup>3</sup>], sus componentes principales son:

- ✓ Analizador de gases de escape combinado MET 6.3.

- ✓ Fuente de alimentación.
- ✓ Sonda de gases de escape de tubería flexible.
- ✓ Interfaz de adquisición de datos a través de un computador portátil
- ✓ Sistema de filtrado de impurezas

El equipo analizador de gases MET 6.3 se observa en la Figura 2.2 y las especificaciones técnicas del mismo se evidencian en la Tabla 2.2.



Figura 2.2. Analizador de gases combinado para motores gasolina y diésel MET 6.3  
(Fuente: Autores, 2018)

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del analizador de gases combinado MET 6.3

Propiedades técnicas de medición						
Magnitudes	Rango de medición	Precisión de - medición	Principio de - medición	Resolución	Tiempo de reacción (T90)	Tiempo del gas
HC (hexano)	0 - 2 000 ppm	± 4 ppm abs. o 3 % rel.	NDIR	1 ppm vol	3,5 s	2,8 s
HC (propano)	0 - 4 000 ppm	± 8 ppm abs. o 3 % rel.				
	4 001 - 10 000 ppm	± 5 % rel.				
	10 001 - 30 000 ppm	± 10 % rel.				
CO	0,00 - 10,00 % vol	± 0,02 % abs. o ± 3 % rel.		0,01 % vol		
	10,00 - 15,00 % vol	± 5 % rel.				
CO2	0,00 - 16,00 % vol	± 0,3 % abs. o ± 3 % rel.				

	16,01 - 20,00 % vol	± 5 % rel.				
O2	0,00 - 25,00 % vol	± 0,02 % abs. o 1 % rel.	Electro- químico	0,01 % vol	5 s	3,3 s
Lambda	0 - 9,999		Calculado según Brett- schneider	0,001		
Coefficiente de opacidad	-1		Medición de extinción	-1	Modo A 0,05 s Modo B 1 s	1,8 s
Grado de – opacidad	0 - 99 %			0.1 %		
Concentración de masa de partículas	1 - 1100 mg/m3			1 mg/m3		
Temp. Motor	0...150 °C			1 °C		
Número de revoluciones	400 ... 8000 min-1			1 min-1		
Alimentación entrada del equipo						
Alimentación de corriente				10...30 V DC		
Consumo de energía				60 W		

(Fuente: KG, M. M. H. G. C. (2016-02-10). Manual de instrucciones original MET 6.1 / 6.2 / 6.3.)

### 2.1.3. Dinamómetro de chasis LPS3000.

Este equipo permite evaluar el torque y la potencia del motor de un vehículo, ejecutar ciclos de conducción preestablecidos, test de opacidad dinámica Lug Down, simulador de carga, evaluar la elasticidad de un motor, control de tacómetro, consumo de combustible, análisis de emisiones contaminantes[19], sus principales componentes son:

- ✓ Consola de mando
- ✓ Juego de rodillos R200/1
- ✓ Ventilador de aire refrigerante
- ✓ Cajas de interfaces – sonda de temperatura de aceite
- ✓ Sistema de extracción de gases de escape

El equipo dinamómetro de chasis LPS3000 se puede observar en la Figura 2.3 y la ficha de especificaciones del mismo en la Tabla 2.3.



Figura 2.3. Dinamómetro de chasis LPS3000  
(Fuente: Autores, 2018)

Tabla 2.3. especificaciones técnicas del dinamómetro de Chasis LPS3000.

Detalle	Valor
Revoluciones del motor	0-10000 rpm
Precisión potencia de rueda +/-	2 % del valor de la medición
Tensión de alimentación	400 V / 50 Hz
Potencia de rueda	30- máx. 400 kW
Velocidad de prueba máx.	200 km/h
Fuerza de tracción máxima	15000 N
Carga máxima por eje (t)	15
Diámetro mínimo de rueda para ensayar	12"

(Fuente: M. G. C. KG., "LPS 3000 Para Camiones," ed, 2005-11-24)

La consola de mando comanda al equipo dinamómetro de chasis y permite cargar el ciclo NEDC para su ejecución,



Figura 2.4. Consola de mando.  
(Fuente: Autores, 2018)



El ventilador de aire refrigerante, Figura 2.5, es un equipo que se va a encargar de mantener la temperatura normal de funcionamiento del vehículo, suministrando aire refrigerante al sistema de refrigeración del vehículo y al convertidor catalítico.



Figura 2.5. Ventilador de aire refrigerante.  
(Fuente: Autores, 2018)

Las cajas de interfaces registran los parámetros en los que se ejecuta el ensayo, número de revoluciones, parámetros medioambientales y temperatura de aceite de motor.

El sistema de extracción de gases de escape evacúa las emisiones contaminantes de los gases de escape de los vehículos durante la ejecución de los ensayos, asegurando el área de trabajo, Figura 2.6.



Figura 2.6. Sistema de extracción de gases de escape.  
(Fuente: Autores, 2018)

#### 2.1.4. Tanque externo de combustible.

Es un depósito que reemplaza al tanque de combustible del vehículo con la finalidad de determinar el consumo de combustible, esto se consigue por diferencia volumétrica.

#### 2.1.5. Sistema de adquisición de datos de temperatura con placa Arduino y termocuplas.

Tarjeta Arduino con programación para la adquisición de datos de la temperatura de gases de escape, constituida por:

- ✓ Placa Arduino mega
- ✓ Termocupla tipo J
- ✓ Software Arduino
- ✓ Software Labview

#### 2.1.6. Vehículo de pruebas

El vehículo de pruebas utilizado es de propiedad del CCICEV, es un vehículo equipado con motor diésel y sus especificaciones se detallan a continuación.

Tabla 2.4. Vehículo de pruebas

	
Marca	CHEVROLET
Modelo	LUV D-MAX 3.0 DIESEL CD TM 4X2
Tipo	CAMIONETA
Año	2011
Transmisión	MANUAL

Tracción		4X2
Placa		PEI7230
Motor	Tipo de alimentación	CRDI
	Cilindrada	2999 cm <sup>3</sup>
	Relación de compresión	18:1
	Numero de cilindros	4 EN LÍNEA
	Potencia máxima	134 @ 3600 (Hp @ rpm)
	Torque	294 @ 1400 – 3000 (Nm @ rpm)

(Fuente: Autores, 2018)

## 2.2. Procedimientos.

Las pruebas se realizan a un vehículo equipado con un motor de encendido por compresión, utilizando combustibles: diésel comercial, mezcla de biodiesel obtenido por transesterificación y mezcla de biodiesel obtenido en condiciones supercríticas.

Para esto se detallan los procedimientos para ejecutar la evaluación.

### 2.2.1. Procedimiento para la preparación del combustible previo a la ejecución de pruebas.

Este procedimiento se lleva a cabo previo a la ejecución de ensayos y para garantizar la homogeneidad de la mezcla.

1. Mantener al motor del vehículo en marcha durante 30 minutos.
2. Cambiar el filtro de combustible con cada mezcla de combustible a utilizar[20].
3. Verificar que no exista fugas en el sistema de escape, así como en el sistema de combustible y aceite de motor; no deben existir salidas adicionales al diseño original, debido a que puede producirse la dilución de los gases de escape[4].
4. Preparar el biodiesel y realizar la mezcla mediante el uso de un agitador magnético durante un periodo de 20 minutos[21].
5. Homogeneizar la mezcla en una primera etapa a 2000 rpm durante 20 minutos[22].
6. Homogeneizar la mezcla en una segunda etapa a 3000 rpm durante 10 minutos[23].
7. Precalentar la mezcla a 60°C[22].
8. Utilizar la mezcla en el vehículo.

## **2.2.2. Procedimiento para la determinación de factores de emisiones.**

La determinación de factores de emisiones de gases de escape de los contaminantes: Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburo (HC) y Óxidos de Nitrógeno (NOx), expresados en unidad de masa sobre distancia recorrida [g/km], bajo el ciclo de conducción NEDC (New European Drive Cycle) en el dinamómetro de chasis LPS3000, se realiza con los siguientes equipos descritos anteriormente:

- ✓ Analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM
- ✓ Analizador de gases combinado para gasolina/diésel MET 6.3
- ✓ Dinamómetro de chasis LPS300
- ✓ Tanque externo de combustible.

La ejecución se realiza de la siguiente manera:

1. Colocar el vehículo de pruebas en el dinamómetro de chasis LPS3000, asegurándolo mediante el uso de correas de tensión; el eje de tracción debe colocarse centrado sobre los rodillos, esto se puede realizar haciendo girar las ruedas del vehículo a una velocidad no mayor a 20 km/h.
2. Realizar una inspección mecánica general del vehículo a fin de garantizar su integridad mecánica durante el ensayo y obtener resultados adecuados que permitan lograr repetibilidad y reproducibilidad (en este punto se verifican principalmente fugas en el sistema de escape).
3. Verificar que los consumidores del vehículo estén apagados (luces, aire acondicionado, radio, etc.)
4. Colocar el ventilador de aire refrigerante a una distancia de 1,50 m de la parte delantera del vehículo[19].
5. Instalar el equipo analizador de gases ON BOARD AXION GLOBAL R/S TM junto al vehículo de prueba suministrando una corriente de 12 voltios.
6. Instalar el equipo analizador de gases combinado para gasolina/diésel MET 6.3 junto al vehículo de prueba suministrando una corriente de 12 voltios.
7. Realizar la verificación de medición de valores de emisiones contaminantes en los equipos utilizando el gas patrón.
8. Instalar simultáneamente en el tubo de escape del vehículo de prueba las sondas de gases de escape de los analizadores MET 6.3 y ON BOARD AXION.
9. Instalar el sistema de extracción de gases de escape en el sistema de escape del vehículo de prueba para evitar una concentración excesiva de gases contaminantes durante la prueba.

10. Identificar y ubicar las cañerías de entrada y retorno de combustible del vehículo de pruebas para intervenir e instalar por medio de acoples el tanque de combustible externo con el cual se podrá identificar el volumen de combustible consumido (para este vehículo no es necesario desactivar algún tipo de control en el sistema de combustible).
11. Medir en un matraz 5000 cm<sup>3</sup> de combustible y colocarlo en el tanque de combustible externo.
12. Colocar la sonda de temperatura de aceite de motor en el lugar de la varilla de nivel para controlar la temperatura del ensayo.
13. En la consola de mando del dinamómetro de chasis LPS3000 ejecutar el software de control del equipo y programar el ciclo NEDC (New European Drive Cycle).
14. Conducir el vehículo de prueba durante el ciclo NEDC, 11017 metros durante 1180 segundos, velocidad promedio 33,6 km/h, velocidad máxima 120 km/h[24], el ensayo debe ejecutarse únicamente por personal autorizado y respetando las condiciones de seguridad del laboratorio.
15. Una vez culminado el ciclo extraer los datos obtenidos y evaluar el nivel de combustible consumido.
16. Con los datos obtenidos aplicar el modelo de combustión simplificado para obtener el resultado de factores de emisiones.

### **2.2.3. Procedimiento para la determinación de la temperatura de gases de escape.**

La determinación de la temperatura de gases de escape se ejecuta a la par del ensayo de determinación de factores de emisiones de gases de escape durante el ciclo NEDC, se utiliza un sistema de adquisición de datos con placa Arduino y termocupla.

La ejecución se realiza de la siguiente manera:

1. Instrumentar el motor del vehículo de prueba colocando una termocupla en el colector de escape.
2. Conectar la interfaz de adquisición de datos entre la placa Arduino y un PC.
3. Introducir la programación de la placa Arduino.
4. Ejecutar el ciclo NEDC de conducción descrito anteriormente.
5. Una vez culminado el ciclo extraer los datos obtenidos.

#### **2.2.4. Determinación del rendimiento de motor.**

La determinación del rendimiento de motor se ejecuta a la par del ensayo de determinación de factores de emisiones de gases de escape durante el ciclo NEDC; se utiliza:

- ✓ Tanque de combustible externo
- ✓ Acoples y mangueras
- ✓ Matraz aforado de 5000 cm<sup>3</sup>
- ✓ Probeta graduada de 1000 cm<sup>3</sup>

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Instalar el tanque de combustible externo como se indica en el procedimiento de determinación de factores de emisiones.
2. Colocar en el tanque 5000 cm<sup>3</sup> de combustible.
3. Ejecutar el ciclo NEDC de conducción descrito anteriormente.
4. Al finalizar el ciclo medir la cantidad de combustible consumido utilizando el matraz aforado y la probeta graduada, el método utilizado es el de diferencia de volúmenes de combustible.
5. Registrar el valor de la distancia recorrida.
6. Calcular el valor de consumo de combustible relacionando el volumen obtenido versus la distancia recorrida.

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos al hacer las pruebas con los combustibles utilizados: Diésel Premium (DP), mezcla de biodiesel obtenido en condiciones supercríticas al 10% (BSC10) y mezcla de biodiesel obtenido por catálisis básica al 10% (BCB10), se analiza la caracterización de las mezclas así como los resultados de emisiones contaminantes medidos en el ciclo de conducción NEDC, las emisiones contaminantes evaluadas son: CO [%], HC [ppm], CO<sub>2</sub> [%], O<sub>2</sub> [%] y NOx [ppm].

#### 3.1. Resultado de medición de las emisiones contaminantes

Las pruebas se realizaron en el vehículo descrito en la Tabla 2.4, mismo que es propiedad de Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares – CCICEV. Se utilizó el ciclo NEDC programado en el dinamómetro de chasis LPS3000.

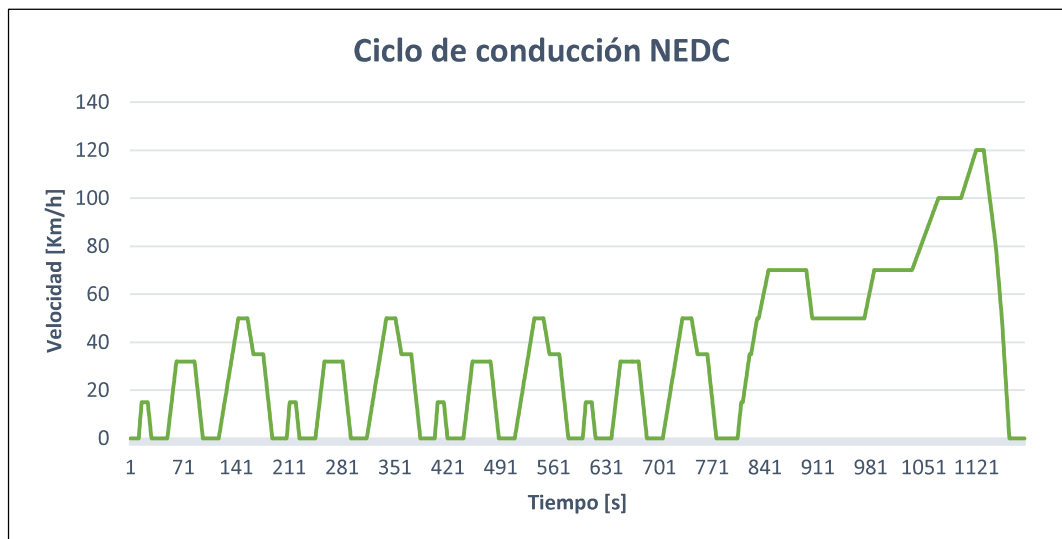


Figura 3.1. Ciclo de conducción programado en el dinamómetro de chasis  
(Fuente: Reglamento no 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE): Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos por lo que respecta a la emisión de contaminantes según las necesidades del motor en materia de combustible [2015/1038] 2015)

El comportamiento gráfico de las emisiones contaminantes resultado del análisis para los combustibles utilizados, se muestran a continuación; mismos que permiten identificar la condición del registro de datos durante el ensayo.

El comportamiento de las emisiones contaminantes para el combustible DP se indica en la Figura 3.2 y la Figura 3.3.

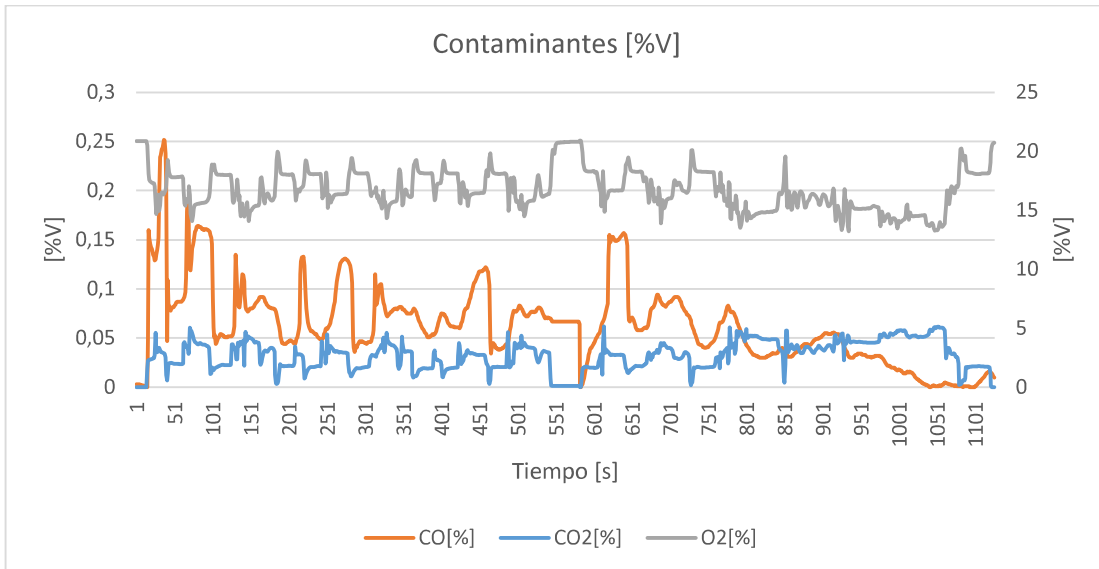


Figura 3.2. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible DP  
(Fuente: Autores, 2018)

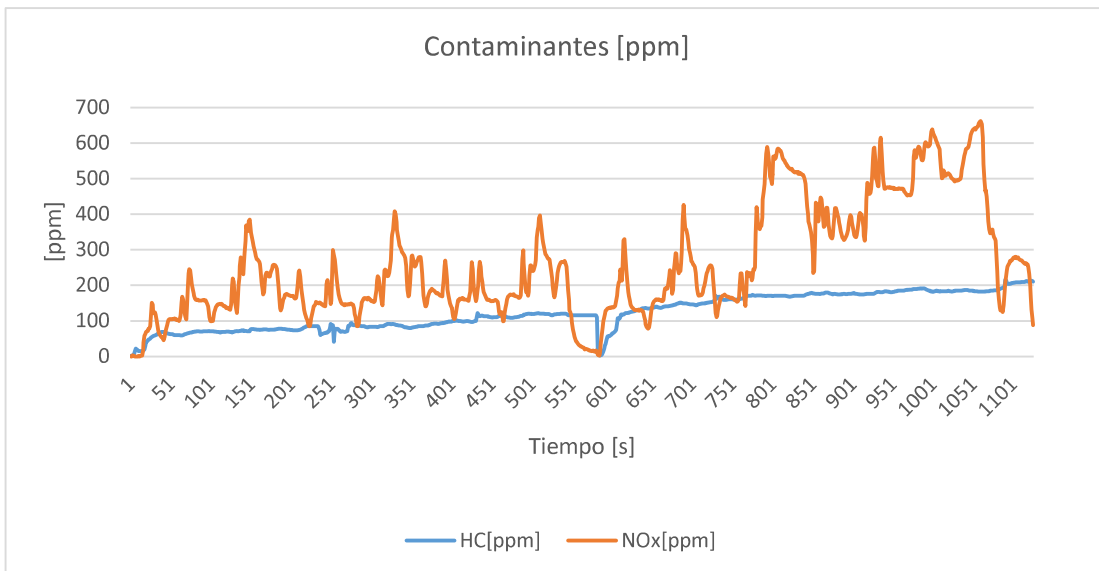


Figura 3.3. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NO<sub>x</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible DP  
(Fuente: Autores, 2018)

El comportamiento de las emisiones contaminantes resultado del análisis para el combustible BSC10 se indica en la Figura 3.4 y la Figura 3.5.



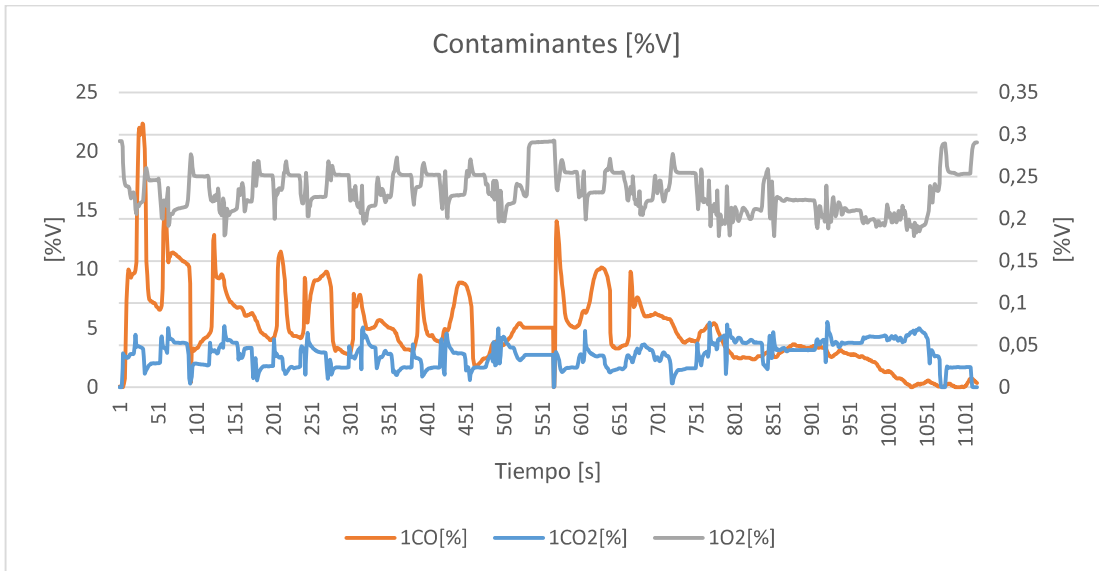


Figura 3.4. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BSC10  
(Fuente: Autores, 2018)

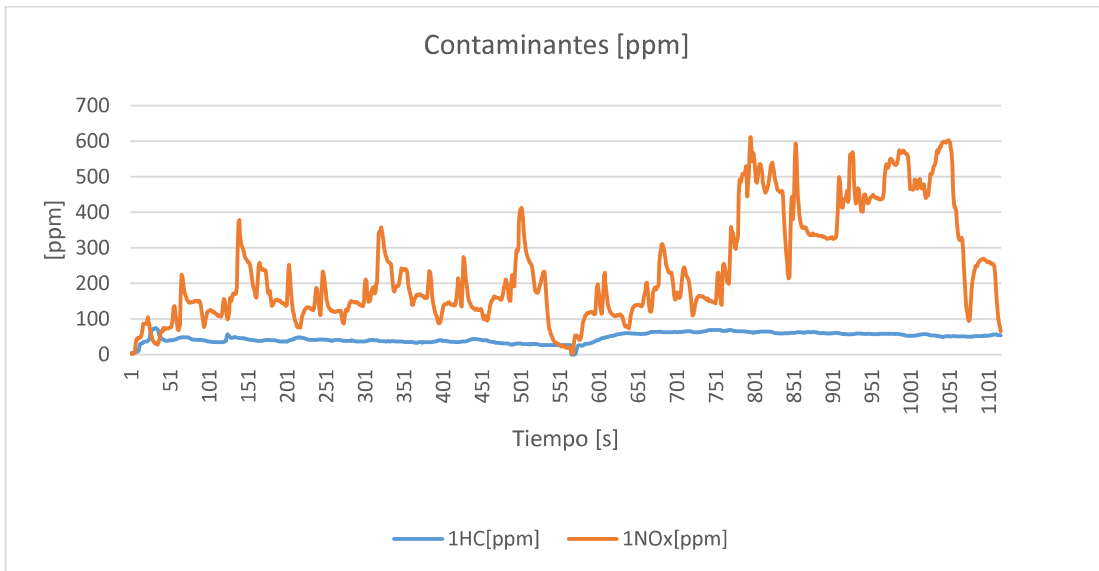


Figura 3.5. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NOx en el vehículo de prueba utilizando combustible BSC10  
(Fuente: Autores. 2018)

El comportamiento de las emisiones contaminantes resultado del análisis para el combustible BCB10 se indica en la Figura 3.6y la Figura 3.7.

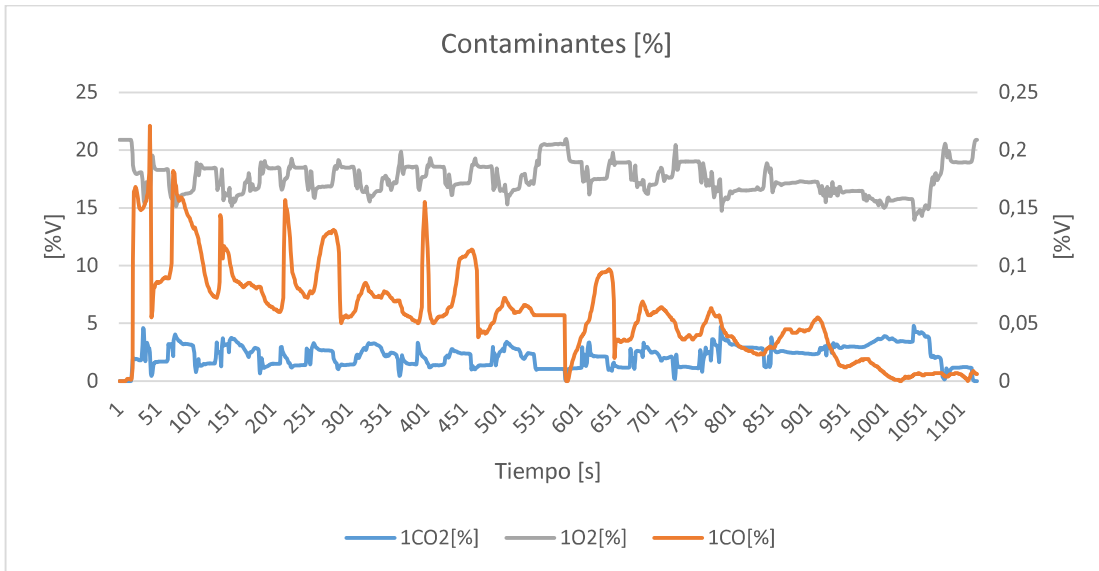


Figura 3.6. Comportamiento de las emisiones contaminantes CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el vehículo de prueba utilizando combustible BCB10  
(Fuente: Autores, 2018)

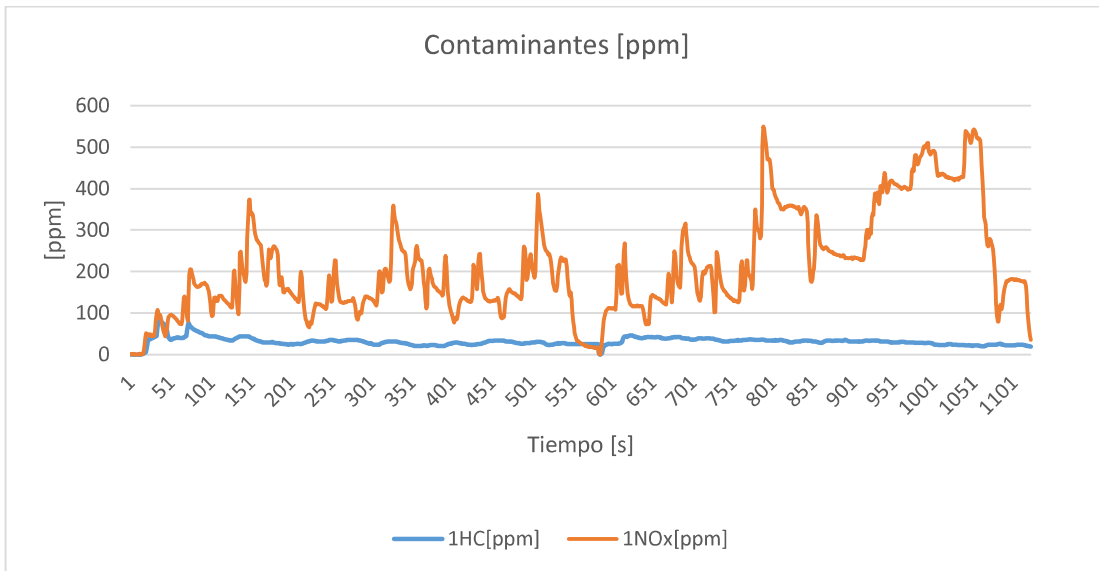


Figura 3.7. Comportamiento de las emisiones contaminantes HC y NOx en el vehículo de prueba utilizando combustible BCB10  
(Fuente: Autores, 2018)

Los resultados promedio de las concentraciones de emisiones contaminantes CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NOx y PM 2.5 emitidas por el sistema de escape del vehículo de prueba al utilizar las mezclas de combustible DP, BSC10 y BCB10 durante el ciclo de conducción se muestran a continuación.

Tabla 3.1. Resultados promedio de las concentraciones de gases de escape

	CO <sub>2</sub> [%]	CO[%]	HC[ppm]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	PM [mg/m <sup>3</sup> ]
DP	2,54	0,060	107	17,10	489	1,09
BSC10	2,56	0,058	62	16,95	519	0,69
BCB10	2,75	0,076	21	17,07	281	1,08

(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.1. Dióxido de carbono CO<sub>2</sub> [%]

El comportamiento muestra un incremento del CO<sub>2</sub> en las mezclas BSC10 y BCB10, esto responde a la mayor cantidad de oxígeno contenido en el biocombustible, el cual ayuda a completar la combustión; lo que es deseable para tener mayor eficiencia en la combustión y una reducción de HC y CO [25] [26].

- La emisión de CO<sub>2</sub> en la mezcla BSC10 respecto del DP se incrementa en un 0,79%.
- La emisión de CO<sub>2</sub> en la mezcla BCB10 respecto del DP se incrementa en un 8,27%.
- La emisión de CO<sub>2</sub> en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 7,42%.

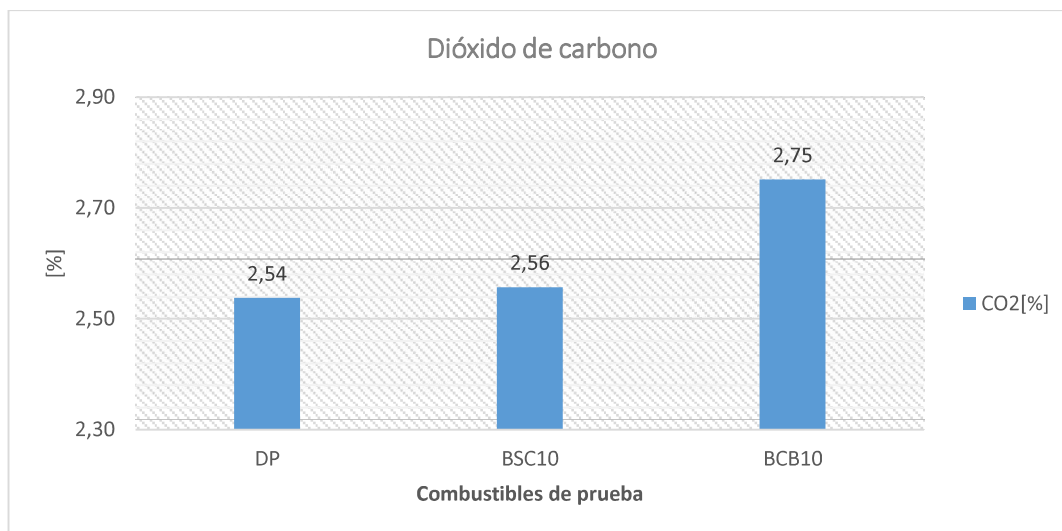


Figura 3.8. Comportamiento del dióxido de carbono  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.2. Monóxido de carbono CO [%]

El CO resultado de la combustión del BSC10 es menor que el DP, lo que indica una mejor combustión por la presencia de oxígeno; el CO resultado de la combustión del

BCB10 es mayor respecto del DP, este comportamiento puede deberse a la eficiencia de la combustión, debido a la mayor cantidad de O<sub>2</sub> presente en la mezcla el carbono del HC se separa convirtiéndolo en CO, se puede evidenciar con la disminución del HC.

- La emisión de CO en la mezcla BSC10 respecto del DP tuvo una reducción del 3,33%.
- La emisión de CO en la mezcla BCB10 respecto del DP se incrementa en un 26.67%.
- La emisión de CO en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 31,03%.

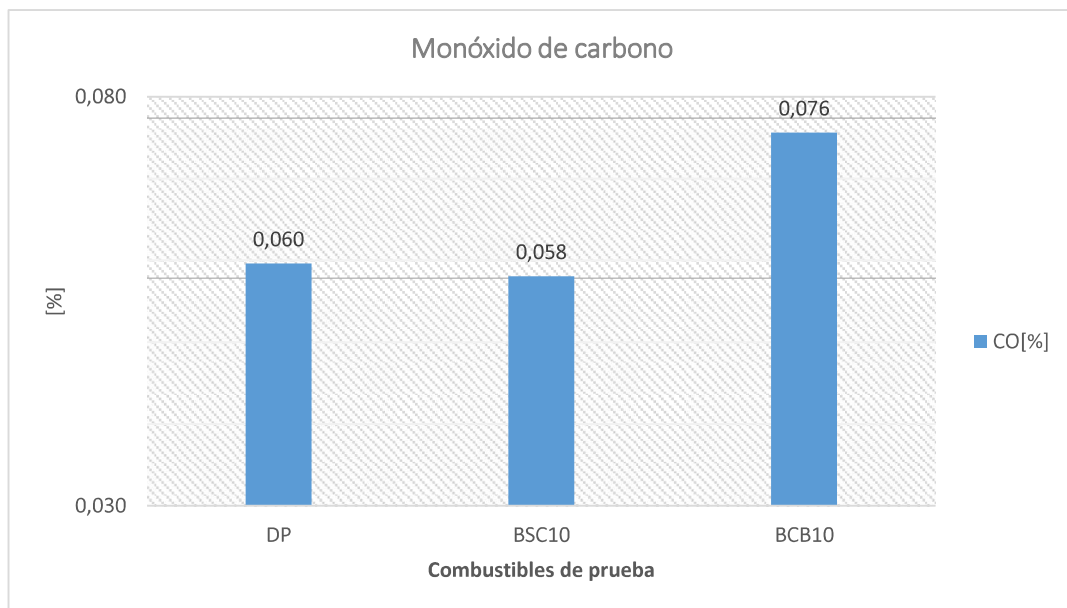


Figura 3.9. Comportamiento del monóxido de carbono  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.3. Hidrocarburo [ppm]

El HC resultado de la combustión muestra un comportamiento de reducción en las mezclas, esto se debe a una mejor combustión por la presencia de oxígeno, lo que confirma que una mayor eficiencia en la combustión se traduce en la reducción de HC [25].

- La emisión de HC en la mezcla BSC10 respecto del DP se reduce en un 42,06%.
- La emisión de HC en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 80,37%.
- La emisión de HC en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se reduce en un 66,13%.

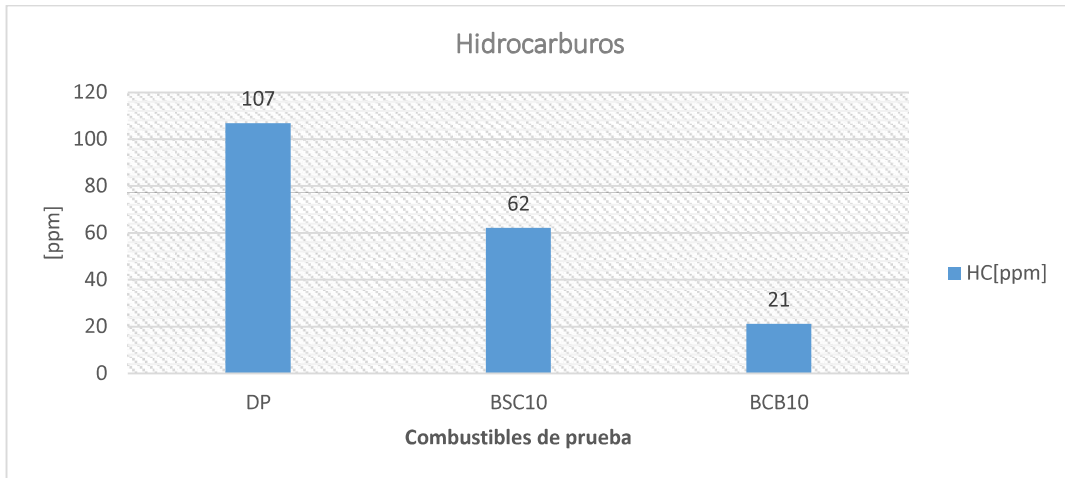


Figura 3.10. Comportamiento de los hidrocarburos  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.4. Óxidos de nitrógeno [ppm]

El comportamiento de los óxidos de nitrógeno en la mezcla BSC10 es de incremento, esto se debe al contenido de oxígeno en el combustible que produce una mejor eficiencia en la combustión elevando la temperatura de la cámara de combustión[22]. En la mezcla BCB10 el comportamiento es de reducción, esto puede deberse a la formación de hollín en la zona de combustión, disminuyendo la temperatura y disminuyendo los NOx.[26]

- La emisión de NOx en la mezcla BSC10 respecto del DP se incrementa en un 6,13%.
- La emisión de NOx en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 42,54%.
- La emisión de NOx en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se reduce en un 45,86%.

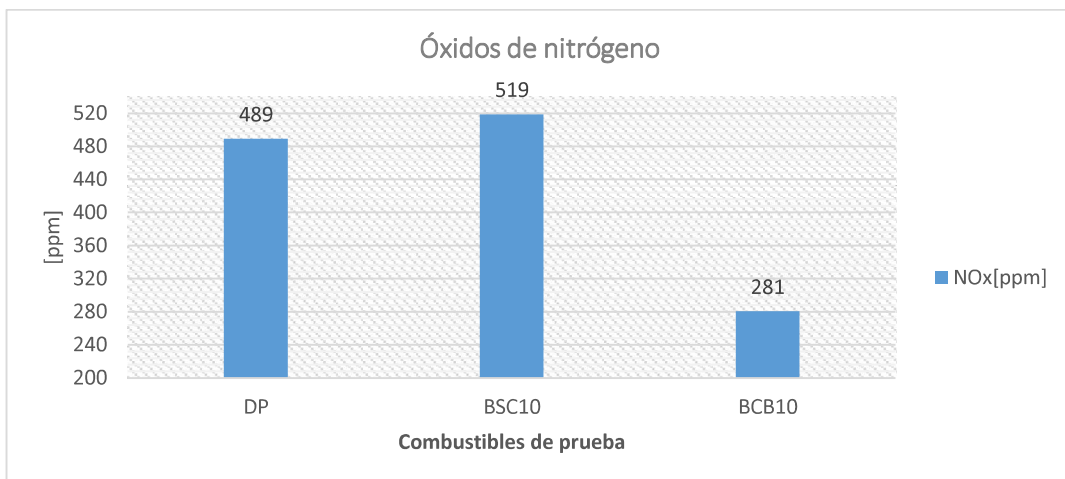


Figura 3.11. Comportamiento de los óxidos de nitrógeno  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.5. Oxígeno

El contenido de oxígeno disminuye en ambas mezclas respecto del Diésel Premium.

- La emisión de O<sub>2</sub> en la mezcla BSC10 respecto del DP se reduce en un 0,88%.
- La emisión de O<sub>2</sub> en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 0,18%.
- La emisión de O<sub>2</sub> en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 0,71%.

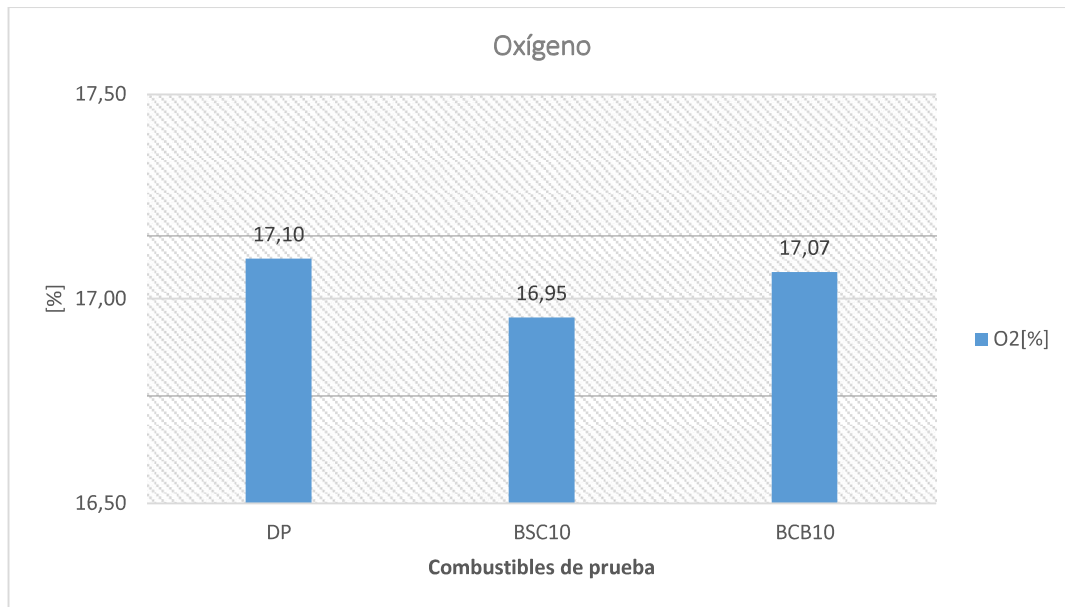


Figura 3.12. Comportamiento del oxígeno  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.6. Material particulado PM 2.5 [mg/m<sup>3</sup>]

En la mezcla BSC10 se observa que existe reducción de material particulado, lo que concuerda con el incremento del NOx como se observa en las figuras 3.13 y 3.19 y la mezcla BCB10 se incrementa respecto de BSC10, lo que concuerda con la reducción del NOx como se observa en la figura 3.19, el fenómeno de reducción de material particulado en BSC10 e incremento en BCB10 se relaciona con la presencia del contenido de azufre en el combustible, tabla 1.2, esto concuerda con estudios realizados por otros autores. [2] [27].

- La emisión de PM en la mezcla BSC10 respecto del DP se reduce en un 36,70%.
- La emisión de PM en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 0,92%.
- La emisión de PM en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 56,52%.

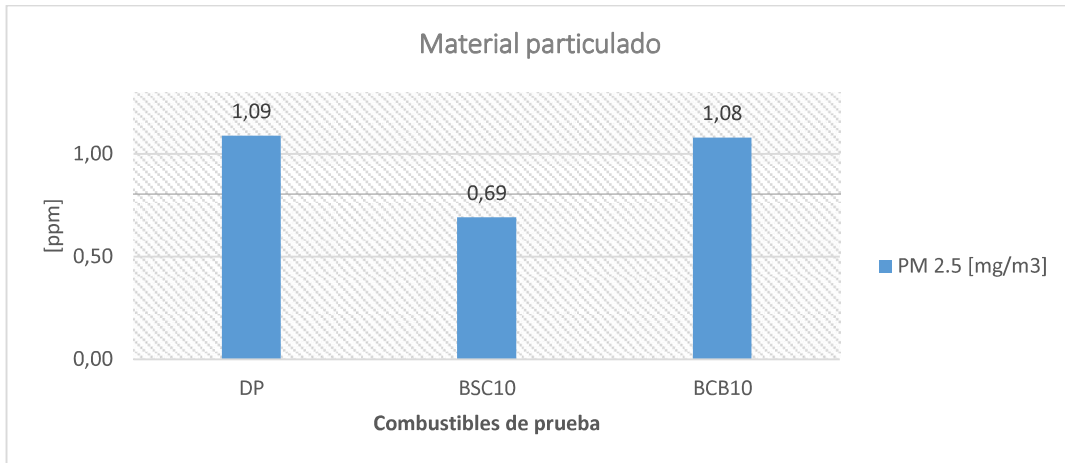


Figura 3.13. Comportamiento del material particulado  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.1.7. Rendimiento de combustible

El comportamiento del rendimiento de combustible indica que existe un mayor consumo con la utilización de las mezclas, lo que concuerda con estudios realizados por otros autores [2] [20], el poder calórico del biodiesel es más bajo que el diésel lo que incrementa el consumo de combustible y la emisión de CO<sub>2</sub>. [27]

- El rendimiento de combustible en la mezcla BSC10 respecto del DP se reduce en un 3,76%.
- El rendimiento de combustible en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 1,56%.
- El rendimiento de combustible en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 2,29%.

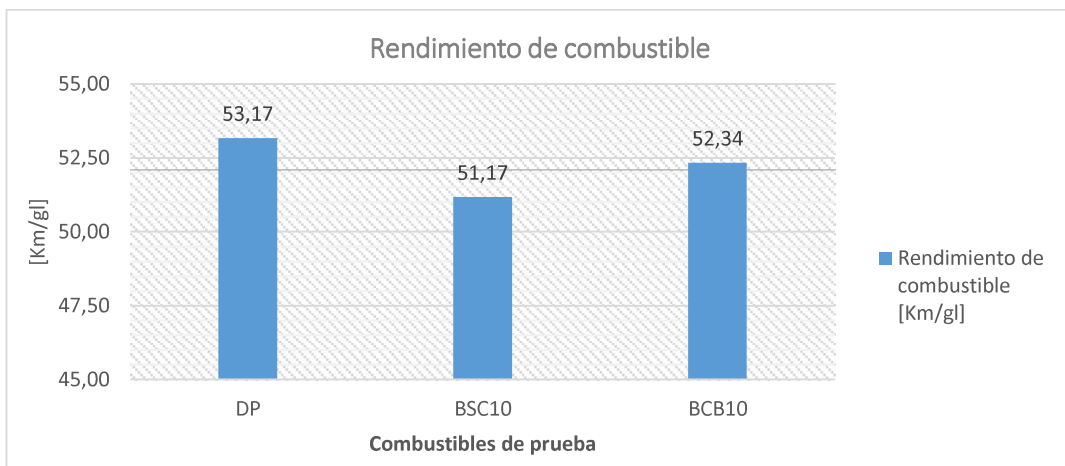


Figura 3.14. Rendimiento de combustible  
(Fuente: Autores, 2018)

En la Figura 3.15 se puede observar la variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimiento de combustible respecto del Diésel Premium (DP).

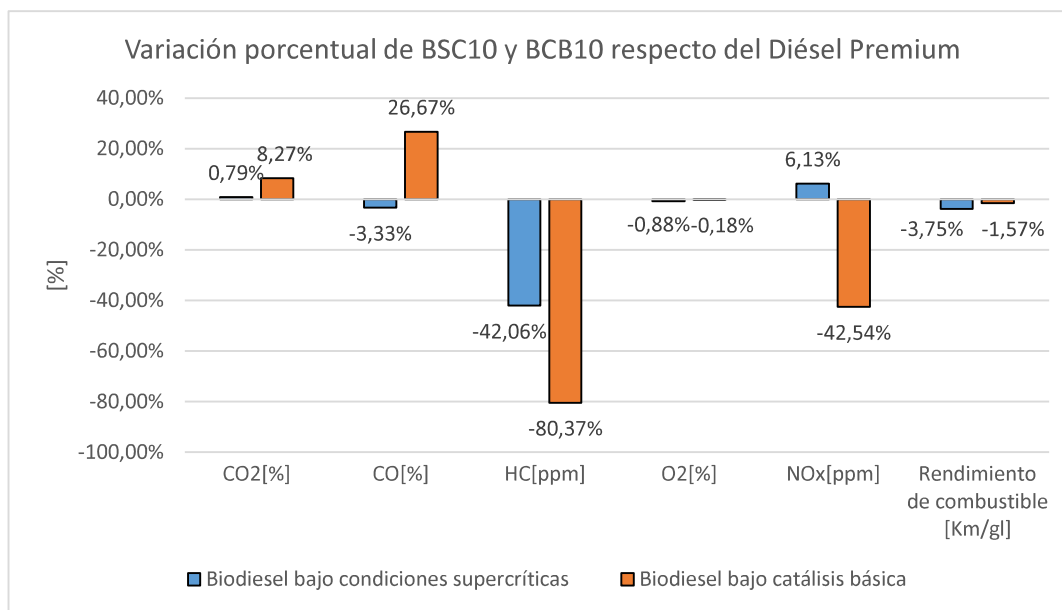


Figura 3.15. Variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimiento de combustible (Fuente: Autores, 2018)

En la Figura 3.16 se puede observar la variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes respecto del Diésel Premium (DP).

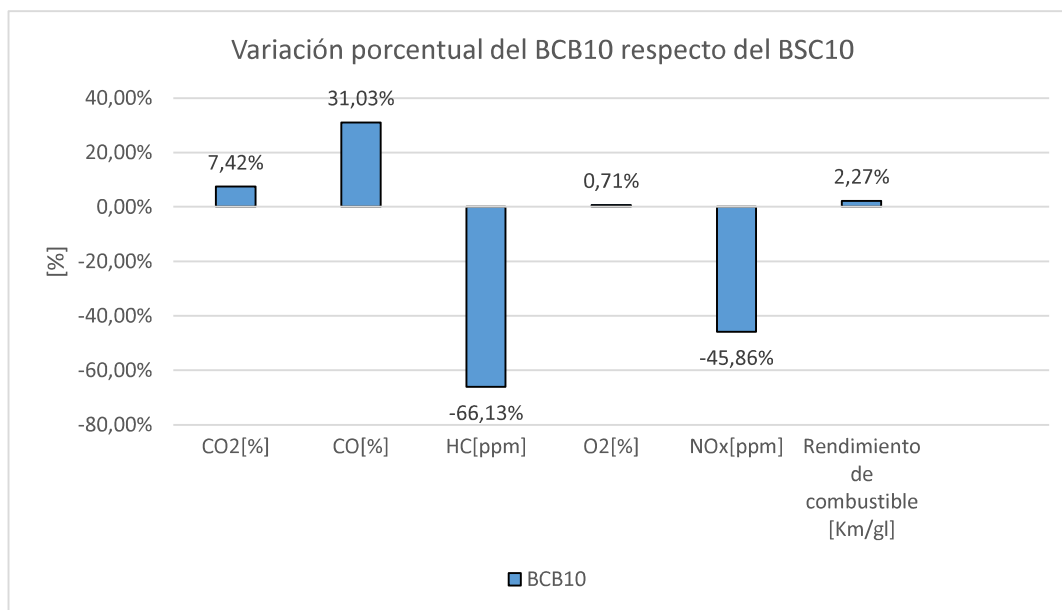


Figura 3.16. Variación porcentual de las concentraciones de emisiones contaminantes y rendimiento de motor del BCB10 respecto del BSC10 (Fuente: Autores, 2018)



### 3.2. Análisis de los factores de emisiones contaminantes

A continuación se muestran los resultados de factores de emisiones contaminantes estimados, utilizando para este cálculo el modelo de combustión simplificado.

Tabla 3.2. Resultados de factores de emisiones utilizando mezclas BSC y BCB

	DP	BSC10	BCB10
FCO (g/Km)	2,67	2,70	3,19
FHC (g/Km)	0,72	0,43	0,13
FNOX (g/Km)	2,35	2,58	1,27

(Fuente: Autores, 2018)

#### 3.2.1. Factor de emisión CO [Km/g]

Se puede observar en la figura 5 que el factor CO se incrementa al utilizar las mezclas de biocombustible, debido a una combustión incompleta ocasionada por la menor atomización del combustible en el momento de la inyección, causada por el incremento en la densidad y en la viscosidad en los resultados de los análisis realizados a los combustibles de prueba.

Se puede observar que el factor CO se incrementa al utilizar las mezclas de biocombustible, esto puede deberse por efectos de la materia prima del biodiesel en ciclos transitorios.[27]

- El FCO en la mezcla BSC10 respecto del DP se incrementa en un 1,12%.
- El FCO en la mezcla BCB10 respecto del DP se incrementa en un 19,48%.
- El FCO en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 18,15%.

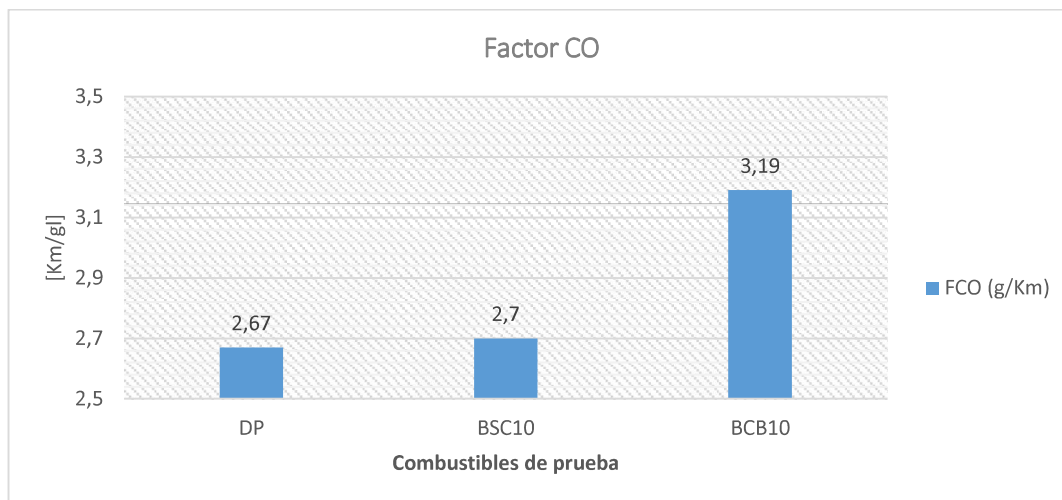


Figura 3.17. Comportamiento del factor de emisión CO  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.2.2. Factor de emisión HC [Km/g]

Se puede observar que el factor HC se reduce al utilizar las mezclas de biocombustible, la reducción del este factor se debe a la cantidad de biodiesel contenida en la mezcla, mayor cantidad de biodiesel en la mezcla reduce el factor HC.[27]

- El FHC en la mezcla BSC10 respecto del DP se reduce en un 40,28%.
- El FHC en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 81,94%.
- El FHC en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 69,77%.

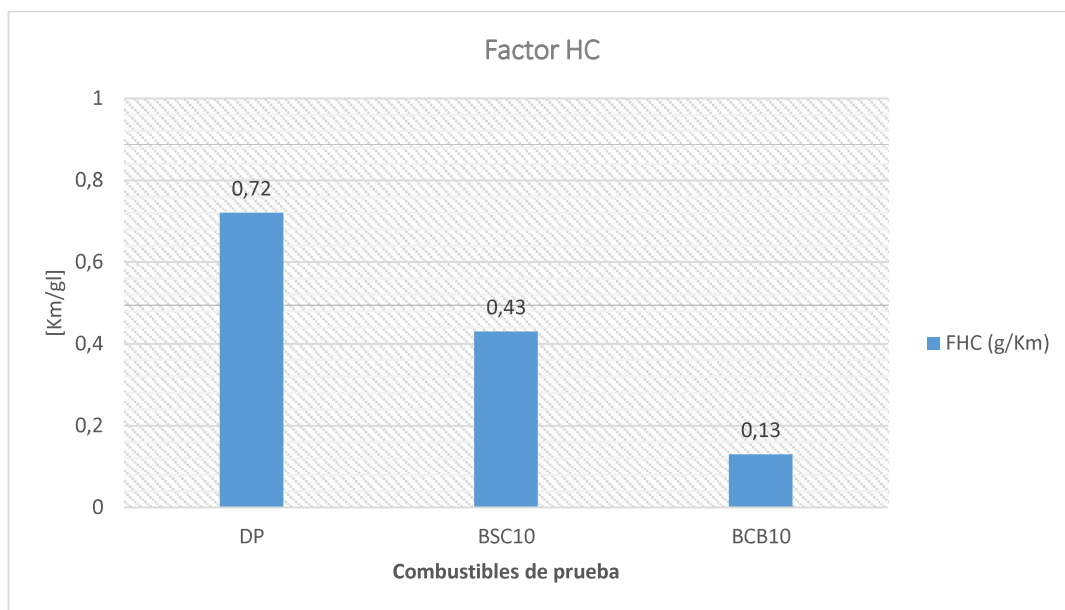


Figura 3.18. Comportamiento del factor de emisión HC  
(Fuente: Autores, 2018)

### 3.2.3. Factor de emisión NOx [Km/g]

Se puede observar en la figura 3.19 que el factor NOx se incrementa al utilizar la mezcla de combustible BSC10, sin embargo al utilizar la mezcla BCB10 el factor de emisión se reduce; la reducción del factor NOx se debe a una baja temperatura de combustión por una inadecuada atomización del combustible inyectado debido a la densidad; también se evidencia el comportamiento natural de los gases, al incrementarse el NOx disminuye el material particulado y viceversa, esto se evidencia relacionando el comportamiento en las figuras 3.19 y 3.13; en el caso del incremento del NOx, se debe a una alta temperatura en la cámara de combustión por el poder calórico del combustible, como se evidencia en los análisis químicos realizados al combustible, lo que finalmente resulta en un aumento de las emisiones de NOx [27].

- El FNOx en la mezcla BSC10 respecto del DP se incrementa en un 9,79%.
- El FNOx en la mezcla BCB10 respecto del DP se reduce en un 45,96%.
- El FNOx en la mezcla BCB10 respecto de la mezcla BSC10 se incrementa en un 50,78%.

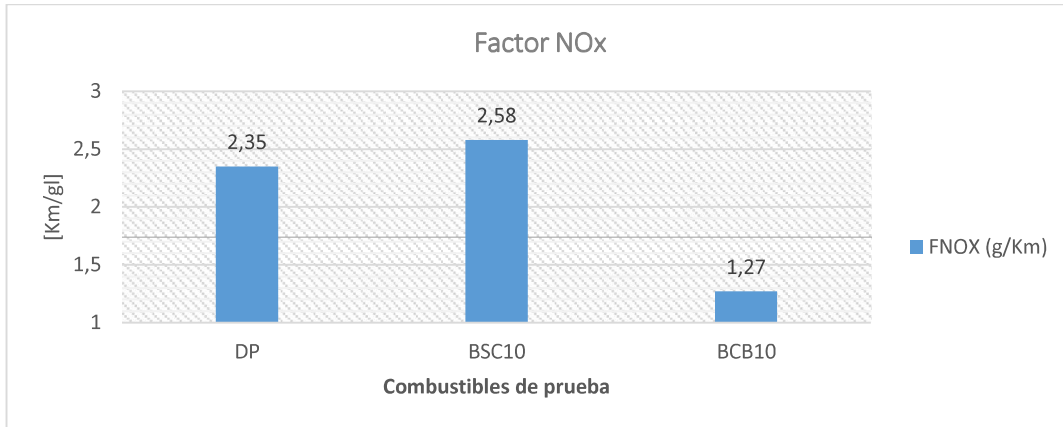


Figura 3.19. Comportamiento del factor de emisión NOx  
(Fuente: Autores, 2018)

En la Figura 3.20 se puede observar la variación porcentual de los factores de emisión estimados, utilizando mezclas de BSC10 y BCB10 respecto del Diésel Premium (DP).

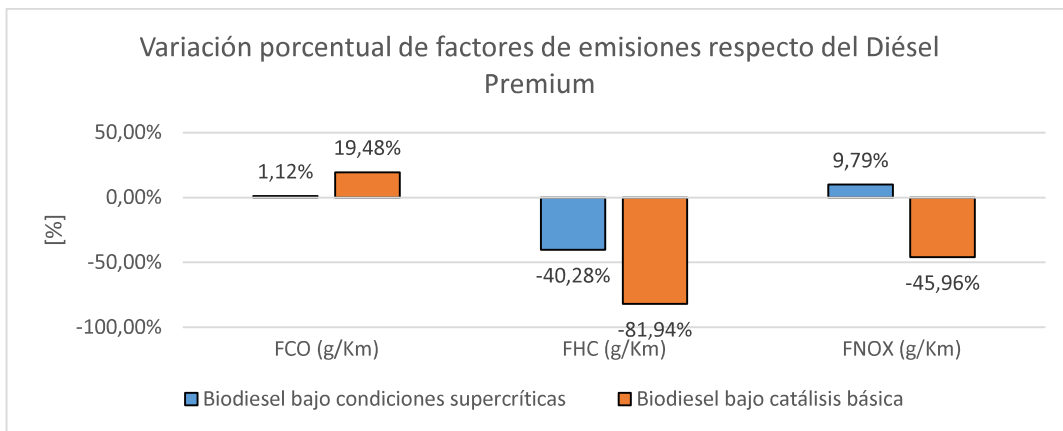


Figura 3.20. Variación porcentual de factores de emisión de BSC10 y BCB10 respecto de DP  
(Fuente: Autores, 2018)

En la Figura 3.21 se puede observar la variación porcentual de los factores de emisión estimados, utilizando la mezcla de BCB10 respecto del BSC10.

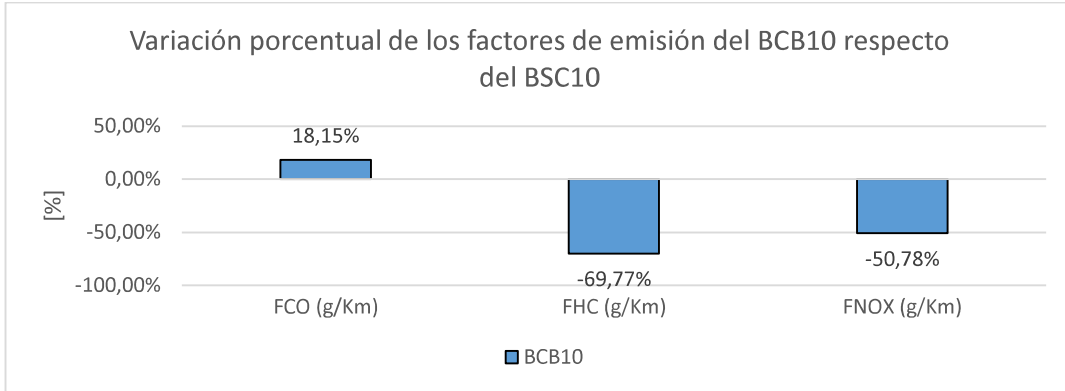


Figura 3.21. Variación porcentual de factores de emisión de BCB10 respecto de BSC10  
(Fuente: Autores, 2018)

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

- De los resultados obtenidos se evidencia que el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> aumenta con el uso de las mezclas de biocombustibles BSC10 y BCB10, esto demuestra que existe una mejora en el proceso de combustión.
- Los factores de emisiones de monóxido de carbono CO aumentan con el uso de las mezclas de biocombustible BSC10 y BCB10.
- Los factores de emisiones de hidrocarburos HC disminuyen al utilizar mezclas de biocombustibles BSC10 y BCB10.
- Los factores de emisiones de óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> aumentan al usar la mezcla BSC10, lo que demuestra que al mejorar el proceso de combustión aumenta la temperatura en la cámara de combustión; no así en la mezcla BCB10, donde se observa que el NO<sub>x</sub> disminuye.
- El material particulado disminuye con el uso de biocombustibles BSC10 y BCB10.
- El rendimiento del combustible disminuye al utilizar las mezclas de biodiesel, debido a que el poder calórico de las mezclas de combustible BSC10 y BCB10 es más bajo; lo que indica que existe un aumento en el consumo de combustible.

### **4.2. Recomendaciones**

- Desde el punto de vista de reducción de emisiones de material particulado PM 2.5, se recomienda el uso del biocombustible obtenido por condiciones supercríticas en mezcla con combustible Diésel Premium (BSC10), existe una ventaja ambiental respecto del BCB10 en la emisión de PM.
- Se recomienda hacer un análisis económico comparando el costo real de los combustibles Diésel Premium con la mezcla de biocombustible BSC10.
- Se recomienda hacer un seguimiento de los componentes mecánicos en cuanto a durabilidad y rendimiento en una muestra de vehículos, así como evaluar el impacto de la mezcla BSC10 en el aceite del motor.
- Se recomienda la implementación del biocombustible obtenido por condiciones supercríticas en mezcla con combustible Diésel Premium (BSC10), en una flota vehicular durante un período determinado, realizar un análisis del impacto de la mezcla BSC10 en los períodos de mantenimiento de la unidades.

## Referencias Bibliográficas

- [1] *Reforma a la resolución No. 070-DIR-2015-ANT que contiene el Reglamento Relativo a los Procesos de la Revisión de vehículos a Motor.*, ANT, 2017.
- [2] M. G. R. M. Mofijur, J. Hyde, A.K. Azad, R. Mamat, M.M.K. Bhuiya., "Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction.," vol. 53, 2016.
- [3] K. T. M.-G. Hongliang Zhang, Michael R. Olson, Tomoaki Okuda, Kenneth A. Walz, James J. Schauer, Michael J. Kleeman, "Atmospheric impacts of black carbon emission reductions through the strategic use of biodiesel in California," *Science of The Total Environment*, vol. 538, 2015.
- [4] *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2207 - GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE DIÉSEL*, 2002.
- [5] F. P. Y. J. DESANTES, *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVAS*. BARCELONA: REVERTÉ S.A., 2011.
- [6] P. PIMI.
- [7] J. C. J. MATAILO, "EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL UTILIZANDO UNA MEZCLA DIESEL-QUEROSENO MEDIANTE PROTOCOLO IM-240," FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2017.
- [8] ELVERS, *HANDBOOK OF FUELS*. WIENHAIM: VILEY-VCH, 2008.
- [9] J. Stratta, "BIOCOMBUSTIBLES: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel," 2000.
- [10] A. BARRIGA, *PRODUCCIÓN Y USO DE ACEITES VEGETALES Y BODIESEL ECUADOR*. GUAYAQUIL.
- [11] M. GURU, *EVALUATION OF BODIESEL PRODUCTION, ENGINE PERFORMANCE, AND EMISSIONS*. 2016.
- [12] Y. H. T.-Y. Aminul Islam, Eng-Seng Chan, "Advances in solid-catalytic and non-catalytic technologies for biodiesel production," *Energy Conversion and Management*, 2014.
- [13] O. FAROBIE, *STATE OF THE ART OF BODIESEL PRODUCTION UNDER SUPERCRITICAL CONDITIONS. PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE*
- [14] K. G, "Influence of oxidized Biodiesel Blends on Regulated and Unregulated Emissions from a Diesel Passenger Car.," *Environ Sci. Technology*,, 2010.
- [15] EPA, " A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions," 2002.
- [16] K. N, "Technical Aspects of Biodiesel and its oxidation stability, International Journal of Chem Tech Research," 2009.
- [17] R. J, "Parámetros de Calidad del Biodiesel de Aceite de Palma, las Mezclas Diésel – Biodiésel y su Incidencia en el Desempeño de Motores Diésel," 2012.
- [18] *Reglamento no 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE): Disposiciones uniformes relativas a la homologación de*

*vehículos por lo que respecta a la emisión de contaminantes según las necesidades del motor en materia de combustible [2015/1038] 2015.*

- [19] M. G. C. KG., "LPS 3000 Para Camiones," ed, 2005-11-24.
- [20] G. B. S. M. O'Shaughnessy, "Performance characteristics and exhaust gas analysis of a diesel engine using biodiesel fuel blends," *Biofuels*, 2017.
- [21] N. H. A.-H. a. K. A. Alnefaie, "A Comparative Study of Almond Biodiesel-Diesel Blends for Diesel Engine in Terms of Performance and Emissions," 2015.
- [22] H. H. M. I.M. Rizwanul Fattah, M.A. Kalam, M. Mofijur, M.J. Abedin, "Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends," *Energy Conversion and Management*, 2014.
- [23] H. H. M. M. Mofijur\*, M.A. Kalam, A.E. Atabani, I.M. Rizwanul Fattah, H.M. Mobarak, "Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine," *Industrial Crops and Products*, 2013.
- [24] S. L. T J Barlow, I S McCrae and P G Boulter, *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. 2009, p. 284.
- [25] O. M. I. Nwafor, "Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester," 2004.
- [26] R. L. M. Janet Yanowitz, "Effect of biodiesel blends on North American heavy-duty diesel engine emissions," 2009.
- [27] J. S. Xianbao Shena, Xinyue Cao, Xin Zhang, Wei Zhang, Hui Wu, Zhiliang Yao, "Real-world exhaust emissions and fuel consumption for diesel vehicles fueled by waste cooking oil biodiesel blends," *Atmospheric Environment*, 2018.

## **ANEXOS**



## ANEXO I. VALORES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

**ANEXO 1.1** Resultados promedio de las concentraciones de gases de escape obtenidas del desarrollo del ciclo NEDC.

	CO2[%]	CO[%]	HC[ppm]	O2[%]	NOx[ppm]	PM [mg/m3]
DP	2,54	0,060	107	17,10	489	1,09
BSC10	2,56	0,058	62	16,95	519	0,69
BCB10	2,75	0,076	21	17,07	281	1,08

**ANEXO 1.2** Resultados promedio del rendimiento de motor expresado en km/gl obtenidos del desarrollo del ciclo NEDC.


	Rendimiento de combustible [km/gl]
DP	53,17
BSC10	51,17
BCB10	52,34

**ANEXO 1.3** Resultados de factores de emisiones utilizando mezclas BSC10 y BCB10

	DP	BSC10	BCB10
FCO (g/Km)	2,67	2,70	3,19
FHC (g/Km)	0,72	0,43	0,13
FNOX (g/Km)	2,35	2,58	1,27

# ANEXO II. REGISTROS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

## ANEXO 2.1 ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO DIÉSEL COMERCIAL

		Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares			
<b>REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN</b>					
CODIGO: CCICEV-LI-EFE	Revisión 0	N°	0		
	Página 1 / 2	FECHA:	19 de noviembre de 2018		
TÉCNICOS RESPONSABLES	Diego Lincango	Kleber Vega			
<b>OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN</b>	<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>				
Evaluación Inicial <input checked="" type="checkbox"/>	Evaluación Regular <input type="checkbox"/>	Prechequeo RTV* <input type="checkbox"/>			
Reevaluación <input type="checkbox"/>	Evaluación RTV*4 <sup>ta</sup> rev <input type="checkbox"/>	Evaluación Tesis <input checked="" type="checkbox"/>			
No. Visita <input type="text" value="1"/>	Otros <input type="checkbox"/>				
*RTV: Revisión Técnica Vehicular ** Los resultados expresados en el presente documento no pueden ser utilizados para aprobar ningún proceso de RTV					
<b>DATOS GENERALES DEL VEHÍCULO</b>					
Marca	CHEVROLET	VIN Chasis / Placa:	PEI7230		
Modelo:	LUV D-MAX 3.0 DIESEL CD TM 4X2	Kilometraje:	62123		
<b>MOTOR (Datos del fabricante)**</b>					
Posición de motor	DELANTERO LONGITUDINAL	No. Motor	N/A		
No. de cilindros y disposición	4 EN LÍNEA	Versión	N/A		
Máxima Potencia (kw/rpm)	134 @ 3600 (Hp @ rpm)	Máximo Torque (Nm/rpm)	294 @ 1400 – 3000 (Nm @ rpm)		
Sistema de enfriamiento	REFRIGERANTE	Tipo de aspiración	TURBOCARGADO		
Cilindrada [cm3]	2999	Transmisión (manual/automatica)	MANUAL		
Combustible / Fuente de energía	DIESEL COMERCIAL	Categoría-Subcategoría-Clase	CAMIONETA		
Tipo	N_1	Año modelo vehículo	2011		
Tonelaje	2,76	País de origen	ECUADOR		
**Opcional en RTV					
<b>Hora de inicio</b>	15:41	<b>Hora final</b>	17:20		
<b>Prueba en ruta o laboratorio</b>	CICLO NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS LPS 3000				
<b>RESULTADOS DEL ANALIZADOR DE GASES</b>					
<b>Parámetros</b>	<b>PRUEBAS DINÁMICAS - ON BOARD</b>				
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
CO [%v]	0,063	0,058	0,059	0,057	0,061
CO2 [%v]	2,69	2,55	2,56	2,52	2,38
HC [ppm]	124	113	108	69	121
O2 [%v]	16,78	17,07	17,12	17,19	17,32
NOx [ppm]	552	504	484	450	457
<b>OBSERVACIONES:</b> _____					
_____					
_____					
Técnico No 1		Técnico No 2			
Firma Responsables: _____		Firma Responsable de Unidad: _____			
Nombres: <input type="checkbox"/> Diego Lincango		<input type="checkbox"/> Kleber Vega		Nombre: <input type="checkbox"/> Ing. Diego Lincango	
Formato de registro primario para ensayo de factores de emisión					

**REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN**

DATOS DEL CICLO UTILIZADO					
CICLO DE PRUEBA			NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS		
DISTANCIA RECORRIDA (Km)			11,007		
DISTANCIA RECORRIDA (m)			11007		
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Consumo en litros	0,85	0,79	0,77	0,75	0,76

CÁLCULO DEL CONSUMO					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Consumo (Km/lt)	12,949	13,933	14,295	14,676	14,483
Consumo (Km/Gl)	48,949	52,666	54,034	55,475	54,745

EMISIONES CONTAMINANTES EN PORCENTAJE					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
CO [%v]	0,063	0,058	0,059	0,057	0,061
CO2 [%v]	2,693	2,546	2,556	2,517	2,375
HC [%v]	0,012	0,011	0,011	0,007	0,012
O2 [%v]	16,781	17,072	17,121	17,192	17,325
NOx [%v]	0,055	0,050	0,048	0,045	0,046

R EN FUNCIÓN DE CO <sub>2</sub>					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
RCO	0,023	0,023	0,023	0,023	0,026
RHC	0,005	0,004	0,004	0,003	0,005
RNOX	0,020	0,020	0,019	0,018	0,019

FACTORES DE EMISIÓN					
Parámetros	DENSIDAD DE COMBUSTIBLE (Kg/m <sup>3</sup> )			837	
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
FCO (g/Km)	2,889	2,606	2,571	2,493	2,811
FHC (g/Km)	0,848	0,764	0,707	0,447	0,841
FNOX (g/Km)	2,705	2,430	2,265	2,094	2,262

PROMEDIO FACTORES DE EMISION	
FCO (g/Km)	2,67
FHC (g/Km)	0,72
FNOX (g/Km)	2,35

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Técnico No 1

Técnico No 2

Firma \_\_\_\_\_

Firma Responsable \_\_\_\_\_

Nombres:  Diego Lincango

Kleber Vega

Nombre:  Ing. Diego Lincango

## ANEXO 2.2 ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO MEZCLA AL 10% DE BIODIESEL OBTENIDO POR CONDICIONES SUPER CRÍTICAS MAS DIESEL COMERCIAL

<b>CCICEV</b>		Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares			
<b>REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN</b>					
<b>CODIGO:</b> CCICEV-LI-EFE	Revisión 0	Nº	0		
	Página 1 / 2	<b>FECHA:</b>	21 de noviembre de 2018		
<b>TÉCNICOS RESPONSABLES</b>	Diego Lincango		Kleber Vega		
<b>OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN</b>	<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>				
Evaluación Inicial <input checked="" type="checkbox"/>	Evaluación Regular <input type="checkbox"/>	Prechequeo RTV* <input type="checkbox"/>			
Reevaluación <input type="checkbox"/>	Evaluación RTV* <sup>4ta rev</sup> <input type="checkbox"/>	Evaluación Tesis <input checked="" type="checkbox"/>			
No. Visita <input type="text" value="2"/>	Otros <input type="checkbox"/>				
*RTV: Revisión Técnica Vehicular ** Los resultados expresados en el presente documento no pueden ser utilizados para aprobar ningún proceso de RTV					
<b>DATOS GENERALES DEL VEHÍCULO</b>					
Marca	CHEVROLET	VIN Chasis / Placa:	PEI7230		
Modelo:	LUV D-MAX 3.0 DIESEL CD TM 4X2	Kilometraje:	62187		
<b>MOTOR (Datos del fabricante)**</b>					
Posición de motor	DELANTERO LONGITUDINAL	No. Motor	N/A		
No. de cilindros y disposición	4 EN LÍNEA	Versión	N/A		
Maxima Potencia (kw/rpm)	134 @ 3600 (Hp @ rpm)	Máximo Torque (Nm/rpm)	294 @ 1400 – 3000 (Nm @ rpm)		
Sistema de enfriamiento	REFRIGERANTE	Tipo de aspiración	TURBOCARGADO		
Cilindrada [cm3]	2999	Transmisión (manual/automatica)	MANUAL		
Combustible / Fuente de energía	MEZCLA B10 SUPERCRÍTICO	Categoría-Subcategoría-Clase	CAMIONETA		
Tipo	N_1	Año modelo vehículo	2011		
Tonelaje	2,76	País de origen	ECUADOR		
**Opcional en RTV					
<b>RESULTADOS DEL ANALIZADOR DE GASES</b>					
<b>Hora de inicio</b>	15:41		<b>Hora final</b>	17:20	
<b>Prueba en ruta o laboratorio</b>	CICLO NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS LPS 3000				
<b>Parámetros</b>	<b>PRUEBAS DINÁMICAS - ON BOARD</b>				
	<b>Medición 1</b>	<b>Medición 2</b>	<b>Medición 3</b>	<b>Medición 4</b>	<b>Medición 5</b>
CO [%v]	0,069	0,059	0,050	0,055	0,058
CO2 [%v]	2,76	2,57	2,52	2,47	2,46
HC [ppm]	47	65	70	65	63
O2 [%v]	16,59	16,99	17,01	17,04	17,14
NOx [ppm]	540	516	511	512	515
<b>OBSERVACIONES:</b> _____					
_____					
_____					
Técnico No 1		Técnico No 2			
Firma Responsables: _____			Firma Responsable de Unidad: _____		
Nombres: Diego Lincango		Kleber Vega		Nombre: Ing. Diego Lincango	
Formato de registro primario para ensayo de factores de emisión					

**REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN**

DATOS DEL CICLO UTILIZADO					
CICLO DE PRUEBA			NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS		
DISTANCIA RECORRIDA (Km)			11,007		
DISTANCIA RECORRIDA (m)			11007		
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Consumo en litros	0,87	0,8	0,81	0,8	0,79

CÁLCULO DEL CONSUMO					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Consumo (Km/lt)	12,652	13,759	13,589	13,759	13,933
Consumo (Km/Gl)	47,824	52,008	51,366	52,008	52,666

EMISIONES CONTAMINANTES EN PORCENTAJE					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
CO [%v]	0,069	0,059	0,050	0,055	0,058
CO2 [%v]	2,765	2,570	2,518	2,474	2,460
HC [%v]	0,005	0,007	0,007	0,006	0,006
O2 [%v]	16,593	16,993	17,012	17,038	17,135
NOx [%v]	0,054	0,052	0,051	0,051	0,051

R EN FUNCIÓN DE CO <sub>2</sub>					
Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
RCO	0,025	0,023	0,020	0,022	0,023
RHC	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
RNOX	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021

FACTORES DE EMISIÓN					
Parámetros	DENSIDAD DE COMBUSTIBLE (Kg/m <sup>3</sup> )			837	
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
FCO (g/Km)	3,169	2,670	2,335	2,599	2,705
FHC (g/Km)	0,324	0,445	0,496	0,459	0,443
FNOX (g/Km)	2,659	2,510	2,575	2,589	2,582

PROMEDIO FACTORES DE EMISION	
FCO (g/Km)	2,70
FHC (g/Km)	0,43
FNOX (g/Km)	2,58

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Técnico No 1

Técnico No 2

Firma \_\_\_\_\_


Firma Responsable \_\_\_\_\_

Nombres:  Diego Lincango

Kleber Vega

Nombre:  Ing. Diego Lincango

## ANEXO 2.3 ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO MEZCLA AL 10% DE BIODIESEL OBTENIDO POR CATÁLISIS BÁSICA MAS DIESEL COMERCIAL

		Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares			
<b>REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN</b>					
CODIGO: CCICEV-LI-EFE	Revisión 0	N°	0		
	Página 1 / 2	FECHA:	23 de noviembre de 2018		
TÉCNICOS RESPONSABLES	Diego Lincango		Kleber Vega		
<b>OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN</b>	<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>				
Evaluación Inicial <input checked="" type="checkbox"/>	Evaluación Regular <input type="checkbox"/>	Prechequeo RTV* <input type="checkbox"/>			
Reevaluación <input type="checkbox"/>	Evaluación RTV* <sup>4ta</sup> rev <input type="checkbox"/>	Evaluación Tesis <input checked="" type="checkbox"/>			
No. Visita <input type="text" value="3"/>	Otros <input type="checkbox"/>				
*RTV: Revisión Técnica Vehicular ** Los resultados expresados en el presente documento no pueden ser utilizados para aprobar ningún proceso de RTV					
<b>DATOS GENERALES DEL VEHÍCULO</b>					
Marca	CHEVROLET	VIN Chasis / Placa:	PEI7230		
Modelo:	LUV D-MAX 3.0 DIESEL CD TM 4X2	Kilometraje:	62299		
<b>MOTOR (Datos del fabricante)**</b>					
Posición de motor	DELANTERO LONGITUDINAL	No. Motor	N/A		
No. de cilindros y disposición	4 EN LÍNEA	Versión	N/A		
Maxima Potencia (kw/rpm)	134 @ 3600 (Hp @ rpm)	Máximo Torque (Nm/rpm)	294 @ 1400 – 3000 (Nm @ rpm)		
Sistema de enfriamiento	REFRIGERANTE	Tipo de aspiración	TURBOCARGADO		
Cilindrada [cm3]	2999	Transmisión (manual/automatica)	MANUAL		
Combustible / Fuente de energía	MEZCLA B10 CATÁLISIS BÁSICA	Categoría-Subcategoría-Clase	CAMIONETA		
Tipo	N_1	Año modelo vehículo	2011		
Tonelaje	2,76	País de origen	ECUADOR		
**Opcional en RTV					
<b>RESULTADOS DEL ANALIZADOR DE GASES</b>					
Hora de inicio	15:41		Hora final	17:20	
Prueba en ruta o laboratorio	CICLO NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS LPS 3000				
Parámetros	PRUEBAS DINÁMICAS - ON BOARD				
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
CO [%v]	0,071	0,079	0,083	0,069	-
CO2 [%v]	<b>2,84</b>	<b>2,73</b>	<b>2,74</b>	<b>2,69</b>	-
HC [ppm]	22	19	22	21	-
O2 [%v]	<b>16,92</b>	<b>17,16</b>	<b>17,05</b>	<b>17,13</b>	-
NOx [ppm]	297	283	291	251	-
OBSERVACIONES: _____					
_____					
_____					
Técnico No 1			Técnico No 2		
Firma Responsables: _____			Firma Responsable de Unidad: _____		
Nombres: Diego Lincango			Nombre: Ing. Diego Lincango		
Kleber Vega					

Formato de registro primario para ensayo de factores de emisión

**REGISTRO DE DATOS DE PRUEBAS DE FACTORES DE EMISIÓN**

**DATOS DEL CICLO UTILIZADO**

CICLO DE PRUEBA		NEDC EN DINAMÓMETRO DE CHASIS				
DISTANCIA RECORRIDA (Km)		11,007				
DISTANCIA RECORRIDA (m)		11007				
Consumo en litros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	
	0,8	0,79	0,79	0,8	-	

**CÁLCULO DEL CONSUMO**

Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Consumo (Km/lt)	13,759	13,933	13,933	13,759	-
Consumo (Km/Gl)	52,008	52,666	52,666	52,008	-

**EMISIONES CONTAMINANTES EN PORCENTAJE**

Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
CO [%v]	0,071	0,079	0,083	0,069	-
CO2 [%v]	2,844	2,730	2,738	2,694	-
HC [%v]	0,002	0,002	0,002	0,002	-
O2 [%v]	16,923	17,155	17,051	17,132	-
NOx [%v]	0,030	0,028	0,029	0,025	-

**R EN FUNCIÓN DE CO<sub>2</sub>**

Parámetros	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
RCO	0,025	0,029	0,030	0,026	-
RHC	0,001	0,001	0,001	0,001	-
RNOX	0,010	0,010	0,011	0,009	-

**FACTORES DE EMISIÓN**

Parámetros	DENSIDAD DE COMBUSTIBLE (Kg/m <sup>3</sup> )			837	
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
FCO (g/Km)	2,926	3,322	3,491	3,016	-
FHC (g/Km)	0,135	0,119	0,141	0,140	-
FNOX (g/Km)	1,309	1,280	1,310	1,166	-

**PROMEDIO FACTORES DE EMISION**

FCO (g/Km)	3,19
FHC (g/Km)	0,13
FNOX (g/Km)	1,27

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Técnico No 1

Técnico No 2

Firma \_\_\_\_\_

Firma Responsable \_\_\_\_\_

Nombres:  Diego Lincango

Kleber Vega

Nombre:  Ing. Diego Lincango

### ANEXO III. EJEMPLO DE CÁLCULO DE FACTORES DE EMISIÓN.

A continuación se muestra un ejemplo del cálculo de factores de emisiones utilizando el modelo de combustión simplificado descrito en el punto 1.7.1 del presente documento, las fórmulas utilizadas son:

$$\frac{gCO}{km} = \frac{28 \frac{\%CO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 * \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{combustible} * CC}{0.014167}$$

$$\frac{gHC}{km} = \frac{42 \frac{\%HC}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 * \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{combustible} * CC}{0.014167}$$

$$\frac{gNO}{km} = \frac{30 \frac{\%NO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 * \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{combustible} * CC}{0.014167}$$

Para el ejemplo se utilizan los datos de la medición 1 de las pruebas realizadas con combustible diésel comercial, mostrados en el Anexo 2.1 ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO DIÉSEL COMERCIAL:

RESULTADOS DEL ANALIZADOR DE GASES ON BOARD	
Parámetros	PRUEBAS DINÁMICAS - ON BOARD
	Medición 1
CO [%v]	0,063
CO2 [%v]	<b>2,69</b>
HC [ppm]	124
O2 [%v]	<b>16,78</b>
NOx [ppm]	552

Se determina el ciclo utilizado y el consumo de combustible

DATOS DEL CICLO UTILIZADO	
Ciclo utilizado	<i>New European drive Cycle - NEDC</i>
Distancia recorrida (Km)	11,007
Distancia recorrida (m)	11007
	<b>Medición 1</b>
Consumo en litros durante el ciclo	0.85



Es necesario expresar el consumo en l/km, teniendo:  $cc = 0,077224$  [l/km].

Los contaminantes expresados en partes por millón [ppm] se transforman a porcentaje en volumen [% V], esto se logra dividiendo para 10000.

EMISIONES CONTAMINANTES EN PORCENTAJE	
Parámetros	Medición 1
CO [%v]	0,074
CO2 [%v]	4,570
HC [%v]	0,003
O2 [%v]	14,560
NOx [%v]	0,042

La densidad del combustible debe expresarse en kg/l, teniendo:  $\sigma_{\text{combustible}} = 837$  [kg/m<sup>3</sup>] = 0.837 [Kg/l].

Se determinan las razones de cada contaminante en función del CO<sub>2</sub>.

$$\frac{\%CO}{\%CO_2} \quad \frac{\%HC}{\%CO_2} \quad \frac{\%NO}{\%CO_2}$$

Parámetros	Medición 1
RCO	0,023
RHC	0,005
RNOX	0,020

Desarrollando tenemos:

$$\frac{\%CO}{km} \frac{28 * 0.02342007}{1.03724907} * \frac{0.837 * 0.077224}{0.014167} = 2.88$$

$$\frac{\%HC}{km} \frac{42 * 0.00460967}{1.03724907} * \frac{0.837 * 0.077224}{0.014167} = 0.85$$

$$\frac{\%NO}{km} \frac{30 * 0.02052045}{1.03724907} * \frac{0.837 * 0.077224}{0.014167} = 2.71$$

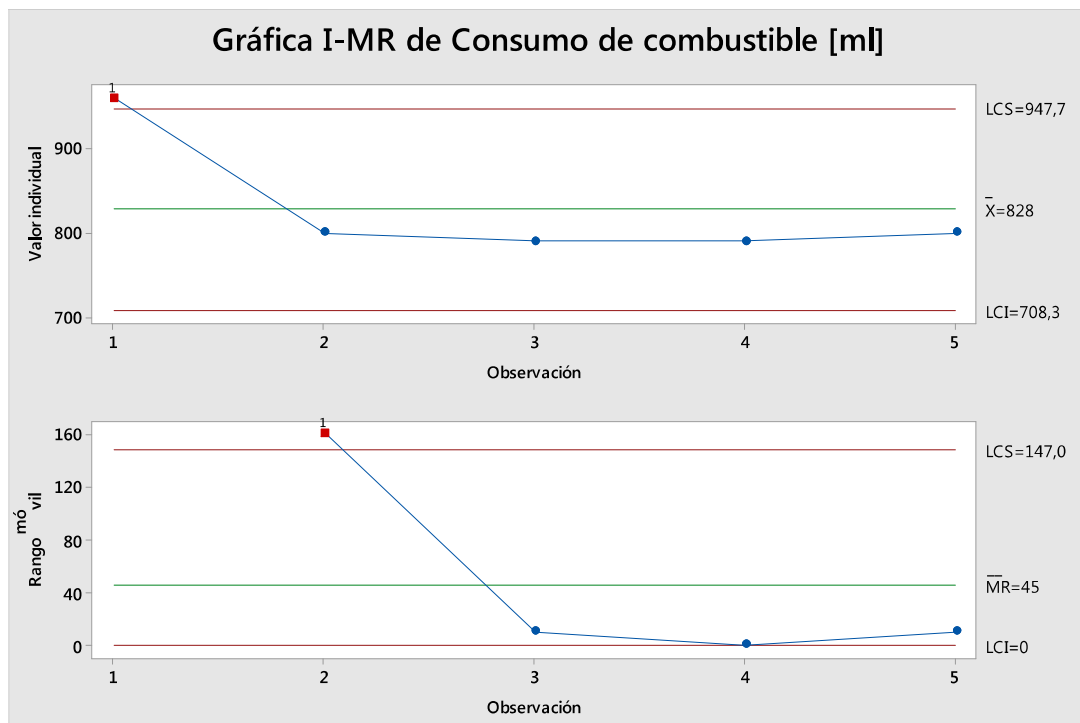
## ANEXO IV. ELIMINACIÓN DE DATOS ATÍPICOS.

En el Anexo 2.3 ANÁLISIS DE FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO MEZCLA AL 10% DE BIODIESEL OBTENIDO POR CATÁLISIS BÁSICA MAS DIESEL COMERCIAL, se puede observar que solamente se utilizaron 4 mediciones de las 5 realizadas esto sucedió debido a que se tuvo un dato atípico debido a una diferencia significativa entre los valores registrados en la determinación del consumo de combustible.

Para esto se hicieron gráficas de control; se utilizó el programa Minitab 18 para este análisis.

Se utilizó una gráfica de rangos móviles (gráfica MR), para determinar si la variación de los resultados se encuentra bajo control, al observar la gráfica se observa que existe variación en uno de los resultados, es decir este punto no está bajo control, está fuera de los límites de control.

La gráfica de valores individuales permite ver la estabilidad del proceso en el tiempo y en este caso el proceso no fue estable en el punto 1 durante la toma de muestras.

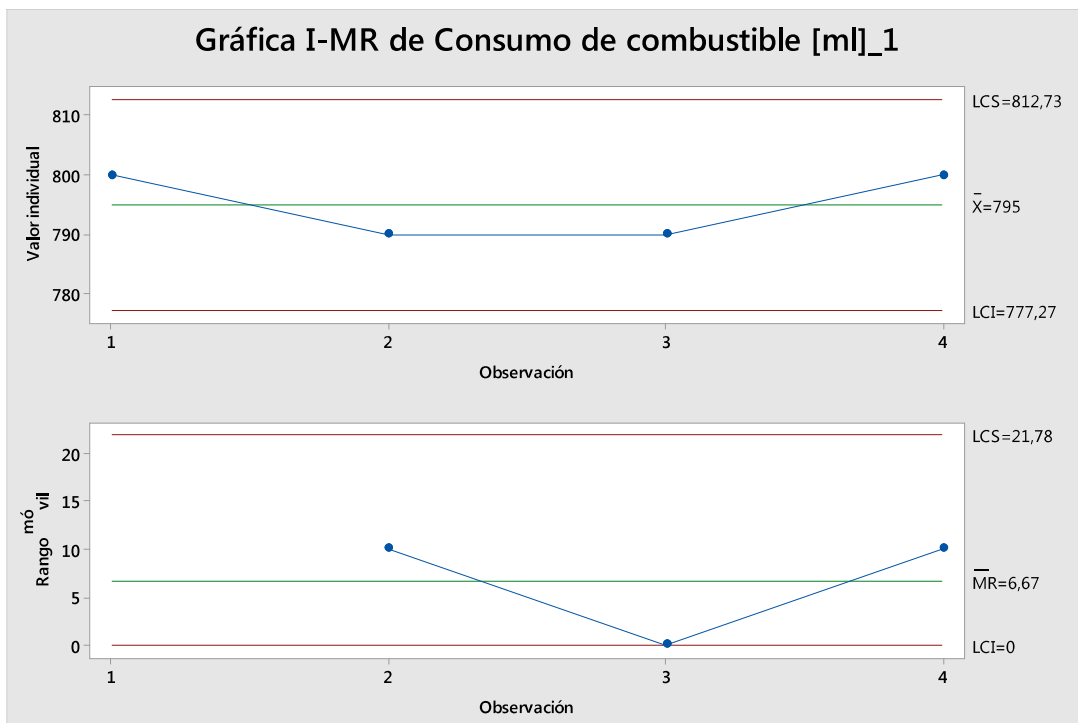


Se concluye que el proceso de determinación de rendimiento de motor [km/g], no está bajo control y no tiene estabilidad; tenemos un valor atípico, por lo que se decidió descartarlo.

Se volvió a realizar el análisis con las gráficas de control descartando el valor atípico, obteniendo los siguientes resultados:

Se utilizó la gráfica de rangos móviles (gráfica MR), para determinar si la variación de los resultados se encuentra bajo control, al observar la gráfica se evidencia que las variaciones de los resultados obtenidos están bajo control y los límites de la gráfica de valores individuales son exactos.

La gráfica de valores individuales permite ver la estabilidad del proceso en el tiempo y en este caso el proceso fue estable durante toda la toma de muestras.



Se concluye que el proceso de determinación de rendimiento de motor [km/g], está bajo control y tiene estabilidad en el tiempo, no tenemos valores atípicos.