

Evaluación de Desempeño y Emisiones de un Motor de Trabajo Pesado Encendido por Compresión Cuando es Operado con Biodiesel y Aceite de Jatropha y Diésel Fósil

Alexander García Mariaca

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá D.C., Colombia
2015

Evaluación de Desempeño y Emisiones de un Motor de Trabajo Pesado Encendido por Compresión Cuando es Operado con Biodiesel y Aceite de *Jatropha* y Diésel Fósil

Alexander García Mariaca

Tesis de grado presentado como requisito parcial para optar al título de :
Magister en Ingeniería - Ingeniería Mecánica

Director(a):
Ph.D., M.Sc, Ing. Helmer Rodolfo Acevedo Gamboa

Línea de Investigación:
Combustibles alternativos, emisiones contaminantes y motores de combustión interna
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Emisiones y Protección al Medio Ambiente
(GICAEPMA)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecátronica
Bogotá D.C., Colombia
2015

(Dedicatoria o un lema)

*A mi madre, esposa, hermanos y sobrinos
que son la fuente inagotable de energía para
conseguir todos los objetivos.*

Agradecimientos

Al Ing. Helmer Acevedo, profesor del departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, por la asesoría y confianza brindada para cumplir a cabalidad con el desarrollo de este trabajo, además de permitirme trabajar en su grupo de investigación.

Al Ing. John Ramiro Agudelo profesor de la Universidad de Antioquia por toda su colaboración y a los integrantes del grupo de investigación GICAEPMA por todas las asesorías brindadas a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo.

.

Resumen

En esta investigación se llevaron a cabo pruebas de desempeño y emisiones específicas al freno de un motor de combustión interna encendido por compresión (MCI-EC) operando con mezclas de aceite y biodiesel de *Jatropha Curcas L.* (JCL) con diésel fósil de bajo contenido de azufre a diferentes condiciones de carga y velocidad rotacional. En las pruebas experimentales se midieron variables como torque, consumo específico de combustible, eficiencia térmica al freno, eficiencia volumétrica, temperatura de gases de escape, emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado. Además, se realizó una evaluación del desgaste sufrido por el motor operando con las mezclas de JCL. Estas mediciones se realizaron con el objetivo de estudiar el comportamiento de un MCI-EC operando con un biocombustible de segunda generación como lo es la JCL. Los resultados obtenidos muestran que el torque y la eficiencia térmica al freno del MCI solo se reducen un 10 % cuando se opera el motor con mezclas de biodiesel de JCL en proporciones hasta del 7 % en volumen y con mezclas de aceite de JCL en proporciones hasta del 5 % y la eficiencia volumétrica se incrementa en promedio un 6 % tanto para las mezclas de aceite y biodiesel de JCL. Por otro lado se evidenció una reducción del material particulado con las mezclas de biodiesel de JCL con diésel siendo mayor esta reducción con el aumento del porcentaje de biodiesel en la mezcla. Sin embargo, se presentaron aumentos del consumo específico de combustible de hasta un 20 % y de las emisiones de CO₂ y NO_x en 21 y 100 % respectivamente para todas las mezclas de los biocombustibles de JCL.

Palabras clave: *Jatropha*, Biodiesel, Material particulado, motores de combustión interna, emisiones.

Abstract

In this research, performance tests and break specific emissions were carried out on an internal combustion engine, specifically on a compression ignition engine (ICE-CI) working with mixtures of oil and biodiesel from *Jatropha Curcas L.* (JCL) with fossil diesel with low sulfur content, under different charge and rotational velocity conditions. These experimental tests measured variables as torque, specific fuel consumption, break specific efficiency, volumetric efficiency, exhaust gases temperature, emissions of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter. Besides, on the engine a spoilage test was made when it was working with JCL mixtures. This test was made with the purpose of studying the behavior of an ICE-IC working with second generation fuels as JCL is. The obtained results show that the torque and break thermal efficiency of the engine is only reduced by 10 % when it is operated with mixtures of JCL biodiesel with up to 7 % in volume and with oil mixtures of JCL with up to 5 % in volume. On the other hand, thermal efficiency rises up in average 6 % for both oil mixtures and JCL biodiesel. In contrast, a

reduction of the particulate matter is observed with mixtures of JCL biodiesel with fossil diesel but incrementing the biodiesel percentage in the mixture, that reduction was even greater. However, increased values, up to 20 %, for specific fuel consumption were presented and for CO₂ and NO_x up to 21 and 100 % respectively for every mixture of JCL biofuels.

Keywords: Jatropha, Biodiesel, Particulate material, internal combustion engines, emissions,

Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen	v
Lista de símbolos	xiv
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema, Hipótesis y objetivos	5
2.1. Planteamiento del problema	5
2.2. Hipótesis	6
2.3. Objetivos	6
2.3.1. Objetivo General	6
2.3.2. Objetivos específicos	6
3. Fundamentos y antecedentes	8
3.1. Fundamentos	8
3.1.1. Desempeño en motores de combustión interna	9
3.1.2. Emisiones en motores de combustión interna	12
3.1.3. Material particulado (PM)	14
3.2. Antecedentes	14
3.2.1. Jatropha Curcas L.	17
3.2.2. Producción de aceite y biodiesel de JCL	19
3.2.3. Pruebas en MCI-EC operados con aceite y biodiesel de JCL	21
3.2.4. Desempeño	22
3.2.5. Emisiones	24
3.3. Desgaste en MCI-EC operando biocombustibles	28
4. Desarrollo experimental	32
4.1. Adecuación y construcción del banco dinamométrico	32
4.2. Generación de conceptos para la adecuación del banco	33
4.3. Motor, instrumentación y equipos de medición	37
4.3.1. Motor	37
4.3.2. Instrumentación y equipos de medición	38
4.3.3. Características de los equipos de medición	39

4.4. Puesta a punto del banco de pruebas de MCI	39
4.5. Matriz experimental	40
4.6. Incertidumbre de las mediciones	42
4.7. Montaje experimental	42
4.8. Caracterización de los biocombustibles	43
4.9. Descripción de las pruebas experimentales	45
5. Resultados y análisis	47
5.1. Desempeño en MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel	47
5.1.1. Torque	47
5.1.2. Consumo específico de combustible al freno	49
5.1.3. Eficiencia térmica al freno	51
5.1.4. Eficiencia volumétrica	53
5.2. Emisiones	55
5.2.1. Temperatura de gases de escape	55
5.2.2. Emisión específica de Dióxido de carbono	57
5.2.3. Emisión específica de óxidos de nitrógeno	59
5.2.4. Emisión específica de monóxido de carbono	61
5.2.5. Emisión específica de material particulado	63
5.3. Desgaste	65
5.4. Comparación de resultados con la literatura	67
6. Conclusiones y recomendaciones	69
6.1. Conclusiones	69
6.2. Recomendaciones	70
Bibliografía	71
A. Anexo: Curva de calibración del LFE	84
B. Anexo: Curva característica del MCI de prueba	85
C. Anexo: Valores de las condiciones atmosféricas obtenidos en las pruebas experimentales.	86
D. Anexo: Resultados de la relación aire-combustible (AF)	87
E. Anexo: Resultados de emisión específica al freno de hidrocarburos sin quemar	89
F. Anexo: Resultados de oxígeno	91
G. Anexo: Resultados de distribución de material particulado	93

Lista de Tablas

3-1. Composición y características del aceite de JCL [6, 16, 13]	20
3-2. Composición y características del Biodiesel de JCL respecto al valor de la norma EN 14214:2003 [6, 16, 13]	21
4-1. Características del MCI	37
4-2. Norma de emisiones para motores diésel estacionarios EU Etapa 3A	37
4-3. Equipos de instrumentación instalados en el banco dinamométrico	39
4-4. Niveles de las variables controlables	40
4-5. Diseño experimental para las mezclas de AJ con diésel	41
4-6. Diseño experimental para las mezclas de BJ con diésel	41
4-7. Incertidumbre expandida calculada para cada instrumento de medición	42
4-8. Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales	44
4-9. Diferencia energética en magnitud y en porcentaje de las mezclas respecto al diésel.	44
5-1. Comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura de los parámetros de desempeño	67
5-2. Comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura de emisiones	68
C-1. Valores de las condiciones atmosféricas obtenidos en las pruebas experimentales.	86

Lista de Figuras

3-1. Plantas diésel de generación en zonas no interconectadas en Colombia para el año 2012 [110].	15
3-2. Áreas promisorias para el cultivo de JCL [104].	16
3-3. Distribución pantropical del cultivo de JLC [94].	17
3-4. Partes importantes de JCL: a-rama, b-corteza, c-hoja, d-flor pistilada, e-flor estaminada, f-sección transversal de fruta inmadura, g-frutos, h-corte longitudinal del fruto [55, 72].	18
4-1. Modelo Caja negra del diseño del banco.	34
4-2. Modelo Caja gris para el diseño del banco dinamométrico de pruebas para MCI.	35
4-3. Conceptos para el diseño de la estructura del freno hidráulico.	35
4-4. Conceptos para el diseño del sistema hidráulico.	36
4-5. Diseño CAD del banco dinamométrico (a) y resultado final del banco dinamométrico (b).	36
4-6. Variables de medición y equipos de medición utilizados en las pruebas experimentales	38
4-7. Emisiones y equipos de medición de gases utilizados para las pruebas experimentales	38
4-8. Montaje experimental	43
4-9. Diagrama de flujo del plan experimental.	46
5-1. Torque a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	48
5-2. Torque a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	48
5-3. Torque a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	49
5-4. BSFC a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	50
5-5. BSFC a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	50
5-6. BSFC a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	51

5-7. Eficiencia térmica al freno a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	52
5-8. Eficiencia térmica al freno a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	52
5-9. Eficiencia térmica al freno a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	53
5-10. Eficiencia volumétrica a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	54
5-11. Eficiencia volumétrica a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	54
5-12. Eficiencia volumétrica a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	55
5-13. Temperatura de gases de escape a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	56
5-14. Temperatura de gases de escape a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	56
5-15. Temperatura de gases de escape a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	57
5-16. BSCO ₂ a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	58
5-17. BSCO ₂ a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	58
5-18. BSCO ₂ a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	59
5-19. BSNO _x a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	60
5-20. BSNO _x a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	60
5-21. BSNO _x a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	61
5-22. BSCO a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	62
5-23. BSCO a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	62
5-24. BSCO a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	63
5-25. BSPM a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	64
5-26. BSPM a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	64

5-27. BSPM a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)	65
5-28. Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b) . . .	65
5-29. Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b) en un MCI operando 512 horas con diésel [10]	66
5-30. Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b) en un MCI operando 512 horas con B20 [10]	66
A-1. Curva de calibración flujo volumétrico aire seco en función de la diferencia de presión	84
B-1. Resultados de torque y potencia de las pruebas de puesta a punto y calibración del MCI	85
D-1. AF a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	87
D-2. AF a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	87
D-3. AF a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	88
E-1. BSHC a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	89
E-2. BSHC a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	90
E-3. BSHC a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	90
F-1. Oxígeno a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	91
F-2. Oxígeno a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	91
F-3. Oxígeno a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).	92
G-1. Distribución de MP en número a 2500 rpm y 50 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	93
G-2. Distribución de MP en número a 2500 rpm y 25 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	93
G-3. Distribución de MP en número a 2200 rpm y 50 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	94

G-4. Distribución de MP en número a 2200 rpm y 25 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	94
G-5. Distribución de MP en número a 1900 rpm y 50 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	95
G-6. Distribución de MP en número a 1900 rpm y 25 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).	95

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\int \int dx dy$
D	Diámetro	m	
k	Número de cilindros	cilindros	
m	Masa	kg	DF
\dot{m}	Flujo de masa	$\frac{kg}{s}$	$\frac{m}{t}$
N	Velocidad de rotación	$\frac{rev}{s}$	$\frac{\omega}{2\pi}$
P	Presión	Pa	$\frac{\vec{F} \cdot \vec{n}}{A}$
S	Carrera	m	
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF
V	Volumen	m^3	$\int dr^3$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Constante de carreras por revolución	$\frac{carrera}{rev}$	
η	Eficiencia	1	Ecuación 3-6 y 3-7
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{m}{V}$
τ	Torque	Nm	Ecuación 3-9

Subíndices

Subíndice	Término
a	aire
c	Combustión
d	Desplazamiento
f	Combustible
m	Mecánica
th	Térmica
k	Condensado
Vol	volumétrica
∞	ambiente

Abreviaturas

Abreviatura	Término
1G	Biocombustibles de primera generación
2G	Biocombustibles de segunda generación
3G	Biocombustibles de tercera generación
AJ	Aceite de jatropha Curcas L.
BJ	Biodiesel de jatropha Curcas L.
BMEP	Presión media efectiva al freno
BP	Potencia al freno
BSCO	Monóxido de carbono específico al freno
BSCO2	Dióxido de carbono específico al freno
BSHC	Hidrocarburos sin quemar específicos al freno
BSMP	Material particulado específico al freno
BSNO _x	óxidos de nitrógeno específicos al freno
CO	Monóxido de carbono
CO2	dióxido de carbono
COV	Compuestos orgánicos volátiles

Abreviatura	Término
<i>EC</i>	encendido por compresión
<i>EP</i>	encendido provocado
<i>FA</i>	Relación aire combustible
<i>FMEP</i>	Presión media efectiva por fricción
<i>FP</i>	Potencia por fricción
<i>GLP</i>	Gas licuado de petróleo
<i>GNV</i>	Gas natural vehicular
<i>HC</i>	Hidrocarburos sin quemar
<i>IMEP</i>	Presión media efectiva indicada
<i>IP</i>	Potencia indicada
<i>JCL</i>	Jatropha curcas L.
<i>LHV</i>	Poder calorífico inferior
<i>MBJ</i>	Mezclas de biocombustibles de jatropha Curcas L.
<i>MCI</i>	Motor de combustión interna
<i>MP</i>	Material particulado
<i>NO_x</i>	óxidos de nitrógeno
<i>rpm</i>	Velocidad angular
<i>ZNI</i>	Zonas no interconectadas

1. Introducción

El consumo de energía es considerado como un indicador del crecimiento económico y del desarrollo social; por otro lado el consumo de energía per-cápita es considerado como la medida de prosperidad de un país. Estas razones hacen que el mundo sea movido hacia una era de energías sustentables, con mayor énfasis en la eficiencia energética y del uso de recursos renovables de energía [25]. Sin embargo, el incremento constante en el consumo de energía ha llevado a un uso desenfrenado de las fuentes primarias de energía, que provienen principalmente de los combustibles fósiles, que causará a futuro un problema de abastecimiento ya que este tipo de fuente de energía (petróleo, gas y carbón) es finita. Por otro lado, la explotación de los hidrocarburos tiene un impacto devastador sobre la biodiversidad del planeta, ya que para su extracción es necesario la deforestación de selvas y la contaminación del agua, lo que conlleva a una disminución en las precipitaciones, disminuyendo así los caudales en los ríos provocando graves erosiones en el suelo [24].

Uno de los dispositivos mecánicos donde más se emplean los combustibles líquidos fósiles son los motores de combustión interna (MCI); esta máquina transforma la energía química proveniente de un combustible en energía mecánica por medio de un proceso de combustión. Los MCI debido a su gran versatilidad tienen diversas aplicaciones industriales, en áreas tales como el transporte marítimo, el transporte terrestre, plantas generadoras de energía, sector agrícola, etc. No obstante, las emisiones de CO, CO₂, HC, NO_x, compuestos volátiles orgánicos (COV) y material particulado (MP) producidas en los procesos de combustión de los MCI son la principal desventaja de estos dispositivos [6], sumado a esto, dichas emisiones están teniendo un impacto devastador en el medio ambiente y en la salud humana, prueba de ello es el cambio climático que está viviendo el planeta y el incremento de las patologías tales como enfermedades respiratorias y cáncer de la población en las grandes ciudades del mundo [124].

En la actualidad numerosas investigaciones centran su foco de atención en incrementar la participación de las fuentes alternativas y renovables de energía en el total global energético y de esta forma hacer más sustentable la producción de energía [1]. Con este incremento se podría satisfacer la creciente demanda energética del mundo, generada principalmente por el incremento industrial de las diferentes naciones y así mejorar las condiciones ambientales de las ciudades, logrando de paso mejorar la calidad de vida de los habitantes. Para el caso de MCI, estas investigaciones van encaminadas a encontrar combustibles líquidos o gaseosos

los cuales permitan una reducción de las emisiones contaminantes sin afectar el desempeño del mismo. Dentro de los combustibles más investigados están el GNV, GLP, hidrógeno, y biocombustibles líquidos de primera y segunda generación [111]; de estos los más prometedores para el remplazo parcial o total de los combustibles fósiles son los biocombustibles de segunda generación, debido a que estos no provienen de cultivos alimenticios y para su uso en MCI, estos no requieren grandes modificaciones en sus sistemas [9].

Los biocombustibles se encuentran clasificados en tres categorías, los de primera generación (1G), segunda generación (2G) y tercera generación (3G). Los 1G son producidos a partir de cultivos alimenticios tales como el maíz, la caña, la remolacha, la palma etc., lo cual no los hace viables para la producción de biocombustibles, ya que producen un incremento en los precios de los alimentos por la competencia alimento-combustible [89]. Los 2G son provenientes de biomasa residual o aceites vegetales tóxicos como la jatropha, estos son los más indicados para la producción de biocombustibles ya que no provienen de cultivos alimenticios; no obstante para la producción de los biocombustibles 1G y 2G se requieren grandes extensiones de terreno para su cultivo [138, 96], lo cual podría acarrear otro tipo de impacto ambiental. Por último están los biocombustibles 3G, los cuales son producidos a partir de algas, estos presentan las mejores características para su producción ya que se tiene un 91 % más de aceite de microalgas por hectárea cultivada en comparación con los biocombustibles 1G y 2G, sin embargo, los biocombustibles 3G aún se encuentran en etapa experimental, lo cual hace que los costos de producción sean altos [79].

Colombia, por su ubicación geográfica, cuenta con un gran potencial para la producción de biocombustibles líquidos tanto de primera como de segunda generación [49]. Los cultivos destinados para este fin son: la caña de azúcar en la producción de bioetanol y de palma africana para la producción de biodiesel [62]. Por otro lado el gobierno nacional ha fomentado el uso de estos biocombustibles por medio de las resoluciones 180687 de 2003 y 182142 de 2007, las cuales establecen las mezclas de bioetanol con gasolina en una proporción del 10 % en volumen y de biodiesel con diésel fósil en una proporción del 7 % en volumen [122]. No obstante este tipo de cultivos están causando un impacto ambiental negativo en el país ya que se están deforestando grandes cantidades de selva y bosques para la producción de caña y palma [14].

El aprovechamiento energético de los biocombustibles líquidos no solo se debe enfocar en el campo de las fuentes móviles (MCI empleados en el sector transporte), sino que también estos pueden ser empleados en las fuentes fijas (MCI de generación eléctrica), esto sería de gran aplicación en países como Colombia que tienen un gran porcentaje de zonas no interconectadas (ZNI) ubicadas a lo largo y ancho de su territorio, que para el caso nacional corresponden al 52 % del territorio colombiano [141, 40].

El uso de los biocombustibles líquidos además de brindar una solución energética, podrían fomentar la economía local, desarrollando el trabajo en cada ZNI ya que para su aplicación en MCI se necesitarían cultivos que absorberían las emisiones de CO₂ producidas por los MCI y plantas de producción para la obtención del biocombustible. Con este tipo de desarrollos integrales se mejoraría la calidad de vida de los habitantes de las ZNI, por otro lado, la tecnología necesaria para la producción y utilización del biocombustible en las fuentes fijas no es alta, razón por la cual, no se requiere personal altamente calificado para dicho fin.

Colombia con sus ricas tierras y grandes recursos hidráulicos presenta una gran capacidad de desarrollar cualquier tipo de cultivo, que podrían proporcionar una mejor alternativa a la palma africana para la producción de biodiesel. Uno de los potenciales cultivos para la sustitución de la palma africana como materia prima para la producción de biodiesel es la *Jatropha Curcas* L.. Esta es una planta que se puede cosechar en cualquier zona tropical del planeta y no requiere de muchos insumos para su cultivo [6]. El biodiesel de *Jatropha* pertenece a los biocombustibles de segunda generación, debido a que su fruto es tóxico, razón por la cual no es apto para el consumo humano [68]. Por otro lado el biodiesel de *Jatropha* presenta similares resultados de desempeño y emisiones que el biodiesel de palma [15] y cuenta con una mayor fluidez en frío con respecto al biodiesel de palma africana lo cual lo hace apto para su utilización en los diferentes pisos térmicos con los que cuenta el país [127], incluso el aceite de *Jatropha* puro se puede utilizar de manera directa o mezclado con diésel en MCI-EC [43].

El objetivo principal de esta investigación es evaluar todas las variables de desempeño y las emisiones reguladas de MCI-EC de generación de referencia Lister Petter LPW3 de trabajo pesado, modificado para trabajar a diferentes condiciones de carga y velocidad de rotación, operando con diferentes mezclas de biodiesel y aceite de *Jatropha Curcas* L. con diésel fósil de bajo contenido de azufre, a condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá. Para la realización de estas pruebas fue necesario la adecuación, construcción, puesta a punto e instrumentación de un banco de pruebas flexible para MCI, ya que el laboratorio de motores de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá no contaba con uno para la realización de los experimentos.

Este documento inicia realizando una compilación teórica de los diferentes parámetros de funcionamiento de MCI, donde se describe paso a paso como se calculan las diversas variables de desempeño y emisiones específicas al freno, posteriormente se presenta una revisión bibliográfica de los resultados de desempeño, emisiones y desgaste en MCI encendidos por compresión operando con mezclas de *Jatropha Curcas* L. y diésel fósil. Luego se procede a describir el desarrollo experimental, partiendo por la adecuación del banco pruebas, pasando por la descripción del motor y de los equipos de medición, montaje experimental, matrices experimentales y caracterización de los combustibles (aceite y biodiesel de *jatropha* y

diésel fósil) para terminar con la descripción de las pruebas experimentales. Seguidamente se presentan todos los resultados obtenidos de desempeño, emisiones específicas al freno y desgaste encontrados en el MCI-EC destinado para las pruebas. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este trabajo.

2. Planteamiento del problema, Hipótesis y objetivos

Este capítulo muestra la problemática que tiene el uso de los combustibles fósiles en el medio ambiente, para luego esbozar la hipótesis de investigación y por último se plantean los objetivos que se realizaron este trabajo de maestría.

2.1. Planteamiento del problema

El incremento desmedido de la población mundial trae consigo un incremento en la demanda energética a nivel mundial, la cual se satisface principalmente con combustibles líquidos y gaseosos que en su mayoría provienen del petróleo. Sin embargo, este recurso energético es un recurso finito, lo que indica que las reservas de este se agotarán, lo cual generará un gran impacto económico y social en todo el planeta [34, 101]. Por otro lado, los combustibles líquidos y gaseosos derivados del petróleo tienen un impacto devastador en el medio ambiente, ya que las emisiones gaseosas de estos combustibles, provenientes de los diferentes procesos de combustión, son causantes del efecto invernadero, lo que está llevando a un fuerte cambio climático que afecta toda la biodiversidad del planeta tierra. Además, estas emisiones también están causando diversos problemas de salud en los seres vivos que habitan el planeta [60, 36].

Colombia no es ajena a la problemática mundial descrita previamente. Datos del banco mundial muestran que para el año 2011 en Colombia el consumo de energía proveniente de los combustibles fósiles representó el 75.6 % del porcentaje total [91], lo que está conduciendo a un fuerte impacto negativo en el medio ambiente y de la salud pública del país [17]. Además, de este porcentaje el mayor consumo de energía de los combustibles fósiles lo realizaron los vehículos automotores, siendo los motores diésel los que más generaron material particulado oscilando entre un 25 y 75 % del total de emisiones antropogénicas de PM10 [121]. Además, las emisiones de CO₂ originadas por la combustión de los combustibles fósiles representan el 77 % de los gases efecto invernadero totales en el país [121].

Por estas razones se hace necesario el uso de combustibles alternativos para que mitiguen el impacto ambiental y social que está teniendo el uso de combustibles fósiles, tanto en fuentes móviles como en fuentes fijas, sin afectar de manera significativa el rendimiento mecánico

de los dispositivos que lo utilizan. Colombia por ser un país con gran potencial agrícola, puede brindar soluciones energéticas con biocombustibles de 2G que permitan un equilibrio entre el sector alimenticio y el sector energético y de paso mejoren la calidad ambiental del país. Uno de los potenciales cultivos para la producción de biocombustibles, debido a su alta adaptabilidad a terrenos y poco consumo de recursos para su producción, es la *Jatropha curcas* L. (JCL), ya que su aceite y biodiesel presentan características similares a las del diésel fósil, razón por la cual estos biocombustibles pueden ser usados de manera directa o en mezclas con diésel en MCI-EC, sin necesidad de realizar modificaciones en los motores [6].

2.2. Hipótesis

Se plantea determinar el impacto que tiene el uso de biocombustibles de *Jatropha Curcas* L en un motor de combustión interna encendido por compresión y de esta forma corroborar si con el uso de este tipo de biocombustibles provenientes de JCL, ya sea aceite o biodiesel, se logra una reducción en las emisiones contaminantes sin afectar el desempeño y el comportamiento mecánico de los componentes del motor.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Investigar y caracterizar las diferentes variables de desempeño y las emisiones específicas al freno reguladas de motores de combustión interna encendidos por compresión operando con mezclas de aceite y biodiesel de *Jatropha Curcas* L con diésel fósil de bajo contenido de azufre.

2.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables de desempeño tales como torque, presión media efectiva al freno, consumo específico de combustible, eficiencia térmica y eficiencia volumétrica de un MCI-EC de trabajo pesado operando con mezclas de aceite y biodiesel de *Jatropha Curcas* L con diésel fósil de bajo contenido de azufre.
- Determinar las emisiones específicas al freno reguladas de CO, CO₂, NO_x, HC, Material particulado y la temperatura de los gases de escape de un MCI-EC de trabajo pesado operado con mezclas de aceite y biodiesel de *Jatropha Curcas* L con diésel fósil de bajo contenido de azufre.

-
- Evaluar de manera cualitativa el desempeño y desgaste mecánico de los componentes del motor durante y después de las pruebas experimentales, cuando el motor operó con mezclas de aceite y biodiesel de *Jatropha Curcas L* con diésel fósil.

3. Fundamentos y antecedentes

Este capítulo presenta el desarrollo conceptual de los fundamentos teóricos para la realización de los cálculos de las diferentes variables de desempeño y emisiones de un motor de combustión interna, posteriormente se realiza una breve descripción de las características de la planta de *Jatropha curcas* L y los requerimientos para su cultivo. Por último se abordan las diferentes técnicas de obtención de aceite y de la transesterificación de este para producir biodiesel.

Se presenta además una detallada revisión bibliográfica de las diferentes variables de desempeño y emisiones de motores de combustión interna encendidos por compresión operando con aceite y biodiesel de JCL de manera o en mezclas con diésel fósil. De la revisión bibliográfica se puede concluir que el uso de biocombustibles de *Jatropha* son tecnológicamente viables ya que los motores no requieren de grandes modificaciones para su aplicación además que no pierden un gran rendimiento y sus emisiones se reducen en comparación con motores operando con diésel.

3.1. Fundamentos

”Los motores de combustión interna (MCI) son máquinas reciprocantes que funcionan con principios térmicos y mecánicos” [115], estos dispositivos transforman la energía química de un combustible en energía mecánica por medio de un proceso de combustión [57]. Este dispositivo por su versatilidad y gran funcionalidad tiene diferentes aplicaciones en diversos sectores de la industria tales como el automotriz, el marino, el aéreo y la generación de electricidad, siendo los de mayor uso los MCI encendidos provocado (EP) y los encendidos por compresión (EC) [115].

La evaluación de los MCI es de vital importancia con el objetivo de determinar su punto óptimo de operación. Los principales parámetros de evaluación en un MCI son la cantidad de energía disponible en el eje (desempeño mecánico) y las emisiones producidas [57]. A continuación se procede a describir como se calculan los parámetros de evaluación más importantes en los MCI.

3.1.1. Desempeño en motores de combustión interna

La potencia indicada (IP por sus siglas en ingles) es el trabajo neto por unidad de tiempo que realiza el fluido de trabajo (mezcla aire combustible) sobre el pistón, Esta se puede obtener a partir del ciclo de trabajo que circunscribe el gas en un diagrama $P - V$, [129, 57]. La ecuación 3-1 relaciona la IP en un MCI:

$$IP = IW_{neto} = k \left(\int P dV \right) \frac{N}{\alpha} \quad [W] \quad (3-1)$$

Donde N son las revoluciones por segundo del motor, k es el número de cilindros del motor y α es la constante de revoluciones por ciclo, siendo de 2 para un motor de cuatro tiempos y de 1 para un motor de dos tiempos [57]. Por otro lado la integral de la presión a lo largo de todo el ciclo da como resultado la presión media efectiva indicada ($IMEP$ por sus siglas en ingles) la cual relaciona el trabajo entregado por el motor de combustión sobre el volumen de desplazamiento (V_d)[129].

$$IMEP = \frac{\alpha IP k}{N V_d} \quad [Pa] \quad (3-2)$$

Por otro lado el IP también está relacionado con la energía química proveniente del combustible. Esta energía se obtiene mediante el proceso de combustión y está dada por la ecuación 3-3 [115].

$$IP = \eta_{ciclo} \eta_c \dot{m}_f LHV \quad [W] \quad (3-3)$$

Donde η_{ciclo} es la eficiencia térmica de ciclo, η_c es la eficiencia de combustión, \dot{m}_f es el flujo másico del combustible que entra en el MCI dado en ($\frac{kg}{s}$) y el LHV es el poder calorífico inferior del combustible dado en ($\frac{J}{kg}$) [115]. Sin embargo, para la obtención del IP se requiere de instrumentos de medición bastante sofisticados instalados en el motor, razón por la cual es mucho más sencillo y práctico medir la potencia al freno (BP por sus siglas en ingles), la cual es la potencia neta de salida disponible en el eje del motor [57].

La potencia al freno siempre tiene un valor menor que la potencia indicada debido a que parte de la energía producida en la cámara de combustión sale del motor en los gases de escape y otra parte de la energía se aprovecha en los diferentes accesorios del motor (AP), en la apertura de válvulas de admisión y escape (PP) y se pierde en la fricción mecánica de los anillos, rodamientos, válvulas, etc. (MP) [108]. Por tal razón el BP se relaciona mediante la ecuación 3-4.

$$BP = IP - PP - AP - MP \quad [W] \quad (3-4)$$

Tipicamente los últimos tres términos de la ecuación (PP, AP, MP) se agrupan en uno solo término, el cual es conocido como potencia por fricción (FP por sus siglas en ingles) [57, 115, 108], de esta forma la ecuación 3-4 queda:

$$BP = IP - FP \quad [W] \quad (3-5)$$

Por otro lado es usual pensar en el BP en términos de la fracción de IP que está disponible en el eje de salida [129, 57, 115, 108]. Para relacionar esto se define la eficiencia mecánica η_m como:

$$\eta_m = \frac{BP}{IP} \quad [\%] \quad (3-6)$$

Valores típicos de η_m en motores modernos operando con mariposa completamente abierta es de 90 % a velocidades entre 1800 y 2400 rpm y decrece hasta un 75 % a máxima velocidad [57]. La ecuación 3-6 también puede ser reescrita en términos de FP reemplazando la ecuación 3-5 en la ecuación 3-6 obteniendo:

$$\eta_m = 1 - \frac{FP}{IP} \quad [\%] \quad (3-7)$$

Observando la ecuación 3-7, se puede apreciar que la η_m es una medida de las perdidas por fricción. Sin embargo, la η_m cambia para las diferentes condiciones de operación del MCI tales como velocidad de giro y condición carga del motor [115]. Como se observa en la ecuación 3-6 el IP y el BP están relacionados con la η_m de la misma forma se pueden relacionar la presión media efectiva al freno ($BMEP$ por sus siglas en ingles) y la presión media efectiva indicada ($IMEP$ por sus siglas en ingles) con la η_m [57], tal y como lo muestra la ecuación 3-8.

$$\eta_m = \frac{BMEP}{IMEP} \quad [\%] \quad (3-8)$$

Valores típicos de $BMEP$ para motores diésel de cuatro tiempos de aspiración natural se encuentran en el rango de 700 y 900 kPa con el MCI operando a potencia máxima [57]. Por otro lado los parámetros de desempeño BP y $BMEP$ también se encuentran directamente relacionados con el torque (τ) de salida del motor, como lo muestran las ecuaciones 3-9 y 3-10 [57, 115]

$$BP = 2\tau\pi N \quad [W] \quad (3-9)$$

$$BMEP = \frac{2\pi\alpha\tau}{V_d} \quad [Pa] \quad (3-10)$$

Otro parámetro importante en el análisis del desempeño de motores es la eficiencia térmica al freno (η_{th}) la cual está relacionada directamente con el BP por medio de la ecuación 3-11 [108]

$$\eta_{th} = \frac{BP}{LHV\dot{m}_f\eta_c} \quad [\%] \quad (3-11)$$

Valores usuales de (η_{th}) son cercanos al 30% [115]. Por último, se puede obtener una relación entre las diferentes eficiencias η_{th} , η_m y η_{ciclo} , por medio de las ecuaciones 3-3, 3-6 y 3-11, obteniendo así como resultado la ecuación 3-12 [108, 57].

$$\eta_{th} = \eta_m\eta_{ciclo} \quad [\%] \quad (3-12)$$

Otra variable importante en la evaluación del desempeño en MCI es la relación aire-combustible (AF) o su inverso la relación combustible-aire (FA) la cual esta dada por la ecuación 3-13 [129, 57, 115, 108]. Es importante mencionar que esta ecuación siempre debe estar en términos másicos (masa de aire por masa de combustible).

$$FA = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{m_f}{m_a} \quad \left[\frac{g_{aire}}{g_{combustible}} \right] \quad (3-13)$$

Valores normales de FA para un motor de encendido por compresión están en el rango de $0,014 \leq FA \leq 0,056$ ($18 \leq AF \leq 70$) [57]. La ecuación 3-13 esta dada por el flujo másico de aire \dot{m}_a que entra a la cámara de combustión del motor, la cual también está dada por la ecuación 3-14 [57]:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,\infty}\eta_{vol} \quad \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3-14)$$

Siendo $\dot{m}_{a,\infty}$ el flujo de aire ideal a las condiciones de presión y temperatura de entrada en el MCI dado por la ecuación 3-15 y η_{vol} es la eficiencia volumétrica a las condiciones de presión y temperatura atmosféricas, [57, 115].

$$\dot{m}_{a,\infty} = \rho_{a,\infty} k V_d \frac{N}{\alpha} \quad \left[\frac{g}{s} \right] \quad (3-15)$$

Remplazando la ecuación 3-15 en la ecuación 3-14 y despejando la η_{vol} se obtiene la ecuación 3-16 [57]. Valores usuales de η_{vol} en motores de aspiración natural se encuentran en el rango de 80 y 90 % [57, 115].

$$\eta_{vol} = \frac{\alpha \dot{m}_a}{\rho_{a,\infty} V_d N} \quad [\%] \quad (3-16)$$

Por último uno de los parámetros más importantes en un MCI es el consumo específico de combustible al freno (*BSFC* por sus siglas en ingles), el cual relaciona el flujo de combustible por potencia de salida en el MCI y sus unidades son $g/kWhr$. Los motores de combustión interna de encendido por compresión presentan valores de *BSFC* cercanos a los $250 g/kWhr$ con este operando a máxima carga [129, 57, 115, 108].

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{BP} \quad \left[\frac{g}{kWhr} \right] \quad (3-17)$$

3.1.2. Emisiones en motores de combustión interna

Las emisiones son gases indeseables generados en el proceso de combustión de en MCI. Estas emisiones contaminan el medio ambiente y contribuyen al calentamiento global, la lluvia ácida, la mala calidad del aire y además producen diversos problemas de salud en la población [115]. Las principales causas para la formación de estas emisiones, son los procesos de combustión no estequiométricos, la disociación de nitrógeno y las impurezas en el combustible y el aire [115, 57].

Las emisiones que más preocupación causan son los hidrocarburos sin quemar (HC), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), el azufre, y las partículas de carbono sólidas. Es por esto que el control de las emisiones contaminantes es el factor que gobierna el diseño de los modernos sistemas de combustión [108].

Las emisiones gaseosas que se analizan en un MCI principalmente son el dióxido de carbono (CO_2), que es el gas de efecto de invernadero que más emiten los MCI [108]; el monóxido

de carbono CO , que es una de las especies contaminantes más importantes emitida en los diferentes procesos de combustión, también es un indicador de la eficiencia del proceso de combustión del MCI [108]; los hidrocarburos sin quemar HC (aldehídos, alcanos, alquenos, etc.), que se generan por el irregular proceso de combustión en el MCI que conduce a la formación de hidrocarburos (HC), el cual se produce por varios motivos, como por ejemplo, el apagado de llama por efecto pared, insuficiente evaporación del combustible, fugas de escape, cortocircuito de la carga fresca (principalmente en motores de dos tiempos), combustible atrapado en pequeños volúmenes y otras causas menos comunes [108].

Por último se encuentran los óxidos de nitrógeno NOx (NO y NO_2) donde el NO , es uno de los principales responsables de la lluvia ácida y potencialmente productores de smog foto químico, además participa en la reducción de ozono en la estratosfera facilitando así el paso de la radiación solar ultravioleta hasta la superficie terrestre la cual puede producir cáncer de piel y el NO_2 , que es de olor penetrante y color marrón rojizo, causante de irritación en los pulmones y de paso reduce su resistencia a enfermedades infecciosas [108].

Las normas de regulación de las emisiones generalmente están basados en emisiones específicas al freno, que se definen como masa de emisión emitida por unidad de energía obtenida en el eje del MCI (g/kWh). En general, la notación usual para identificar estas emisiones es BSX, donde el X representa la emisión deseada y el BS es la potencia específica al freno [115, 108], las ecuaciones para el calculo de cada emisión específica al freno se muestran a continuación:

$$BSCO = \frac{\dot{m}_{CO}}{BP} \quad \left[\frac{g}{kWhr} \right] \quad (3-18)$$

$$BSHC = \frac{\dot{m}_{HC}}{BP} \quad \left[\frac{g}{kWhr} \right] \quad (3-19)$$

$$BSCO_2 = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{BP} \quad \left[\frac{g}{kWhr} \right] \quad (3-20)$$

$$BSNOx = \frac{\dot{m}_{NOx}}{BP} \quad \left[\frac{g}{kWhr} \right] \quad (3-21)$$

3.1.3. Material particulado (PM)

Las emisiones solidas en MCI corresponden al material particulado (*MP*). Estas partículas se componen principalmente en un núcleo de carbono elemental con varios compuestos orgánicos, sulfatos, óxidos de nitrógeno, metales pesados, oligoelementos y sustancias irritantes tales como acroleína, amoníaco, ácidos, vapores de combustible, aceites lubricantes no quemados, etc. [8]. Estas emisiones se producen principalmente en MCI-EC o en MCI-SI de inyección directa [57]. Esta emisión también se suele reportar en términos de la masa tal y como lo describe la ecuación 3-22.

$$BSMP = \frac{\dot{m}_{MP}}{BP} \quad \left[\frac{g}{kW hr} \right] \quad (3-22)$$

Por otro lado, en la actualidad uno de los parámetros más importantes son el número de partículas y la distribución de material particulado. Este parámetro es muy importante tenerlo controlado porque son la cantidad de partículas las que causan graves daños en la salud humana [123]. Para mitigar esto se han diseñado dispositivos tales como filtros de partículas, con el objetivo de disminuir el número, el diámetro y por ende la masa del material particulado [52].

3.2. Antecedentes

El uso de biocombustibles se ha convertido en una necesidad para el sector productivo mundial, ya que para el progreso sustentable es necesario disminuir la dependencia de las fuentes de energía fósil y reducir las emisiones contaminantes [5]. Debido a esto Colombia ha fomentado la producción de biocombustibles de primera generación (1G) como mecanismo para compensar la balanza energética, posponer los riesgos de pérdida inminente de autosuficiencia petrolera, dinamizar el empleo rural y fomentar el desarrollo agroindustrial de las diferentes regiones del país [62]. Además con el uso de biocombustibles se mejora la calidad del aire y se pueden generar excedentes energéticos, ya que se cuenta con una gran cantidad de plantas generadoras diésel a lo largo y ancho del territorio nacional que tienen una capacidad de generación de 165 MW [110]. La Figura 3-1 muestra la distribución de estas plantas de generación en el país [62, 110].

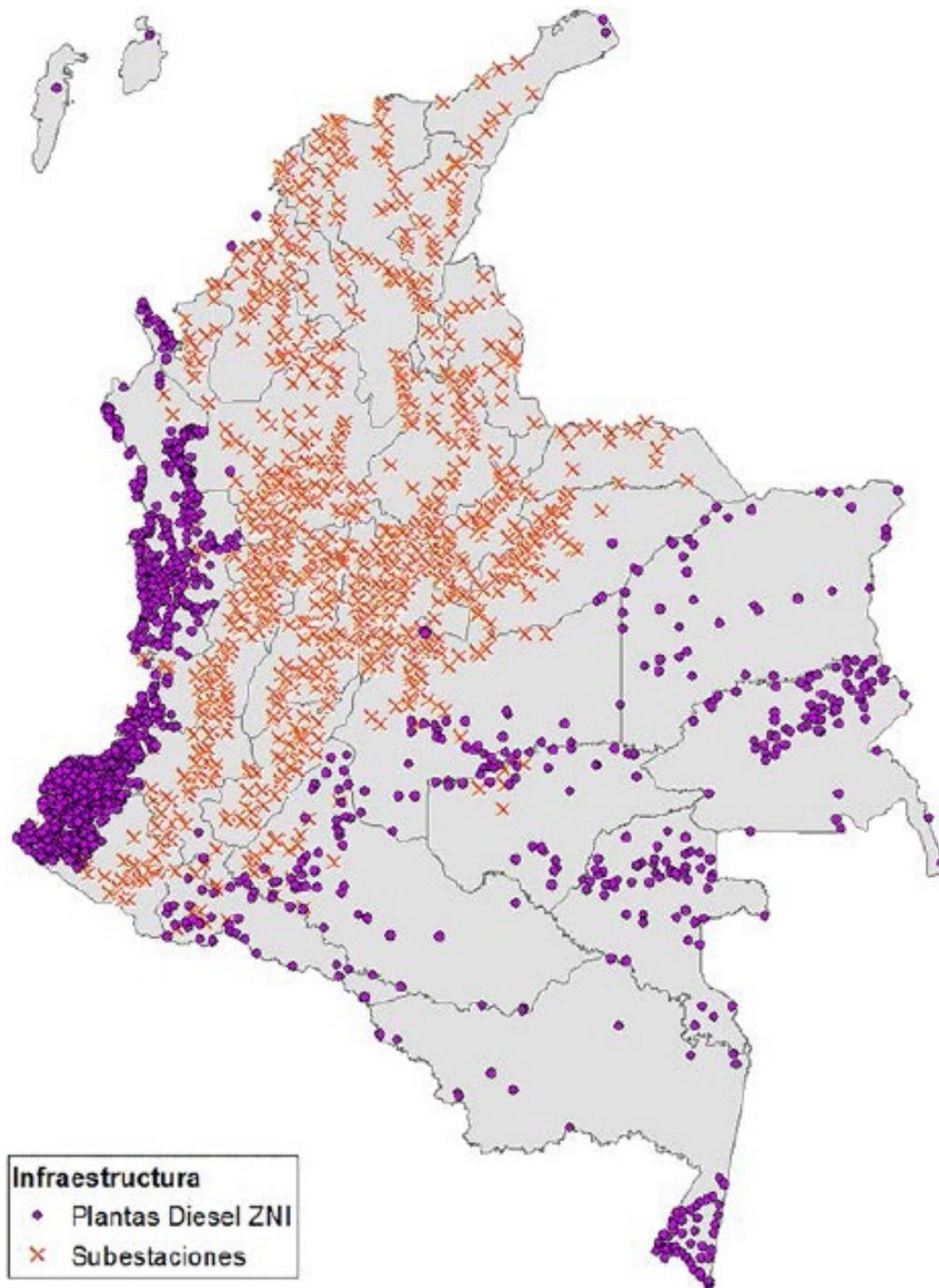


Figura 3-1.: Plantas diésel de generación en zonas no interconectadas en Colombia para el año 2012 [110].

No obstante, este tipo de biocombustibles 1G no son los apropiados para la producción de biodiesel en Colombia, por la gran deforestación de bosques y selvas nativas y por la competencia combustible-alimento que este tipo de biocombustibles genera [89]. Sin embargo,

existen otras materias primas que tienen un gran potencial para ser utilizados en la producción de biocombustibles en el país [109], una de ellas es la *Jatropha Curcas* L. (JCL) la cual se adapta a las tierras colombianas tal y como se muestra en Figura 3-2, pertenece a los biocombustibles 2G y es rentable para la producción de biodiesel debido a la calidad de su aceite, que puede ser utilizado a gran escala en el sector industrial [95, 23].



Figura 3-2.: Áreas promisorias para el cultivo de JCL [104].

Diferentes estudios muestran que la JCL es uno de los mejores cultivos para la producción de biocombustibles, ya que permiten la seguridad alimentaria y energética, la recuperación de tierras marginales y degradadas [6]. También podría permitir el crecimiento económico del sector rural a través del empleo y la producción sostenible de biocombustibles [31, 41].

3.2.1. *Jatropha Curcas* L.

La *Jatropha Curcas* L. (JCL) es un árbol nativo del centro y sur América que pertenece a la familia Euphorbiaceae, aunque en la actualidad se cultiva en toda la región pantropical del planeta, Figura 3-3 [94]. Las características principales de este árbol es que se adapta a suelos secos, temperaturas altas y se puede cultivar hasta una altura de 1800 m sobre el nivel del mar, sin embargo no soporta los fuertes fríos,[41]. Este es un árbol pequeño, que llega a medir entre 5 y 7 metros de altura y se caracteriza por tener una madera suave, tener una expectativa de vida hasta de 50 años y tener una tasa media de consumo de agua para que el cultivo produzca semillas de alta calidad de 1 *L/planta/día* [6, 99, 106]. Las semillas de la JCL contienen toxinas, tales como ésteres de forbol, curcina, inhibidores de la tripsina, lectinas y fitatos a niveles tales que las semillas, aceite y torta de semillas no son comestibles sin desintoxicación [84, 80]. Las partes más importantes del árbol de JCL se muestran en la Figura 3-4.

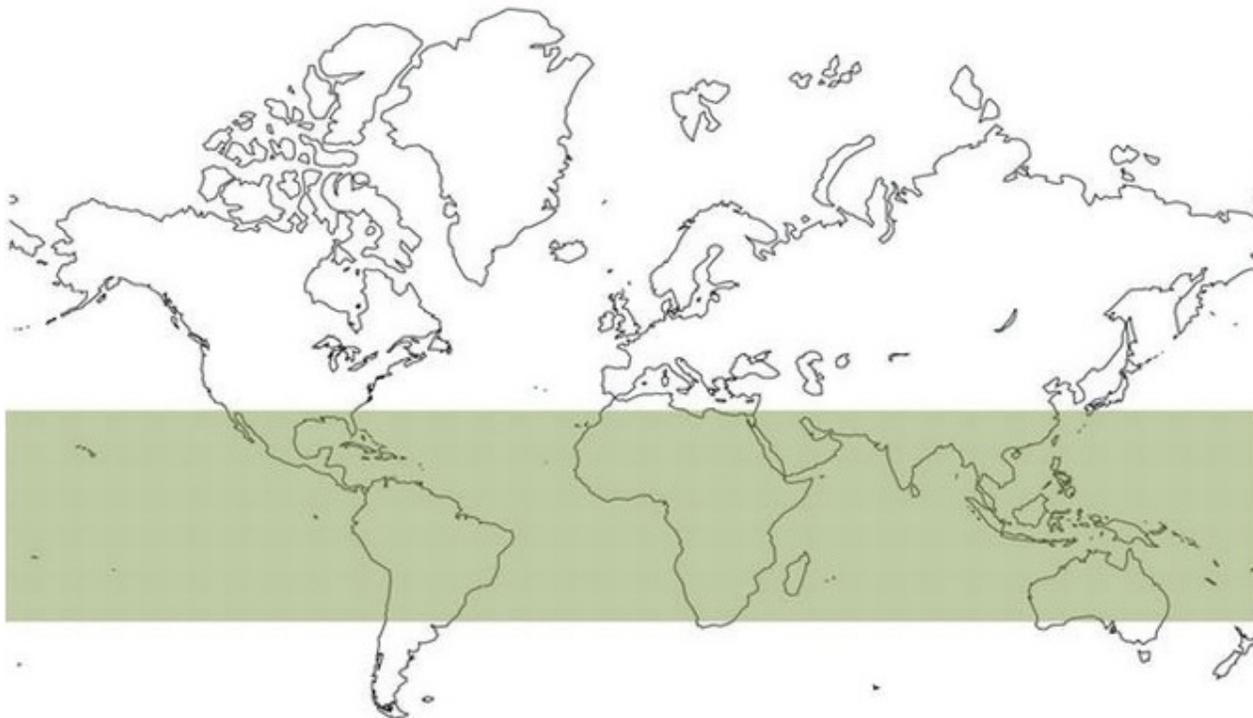


Figura 3-3.: Distribución pantropical del cultivo de JLC [94].

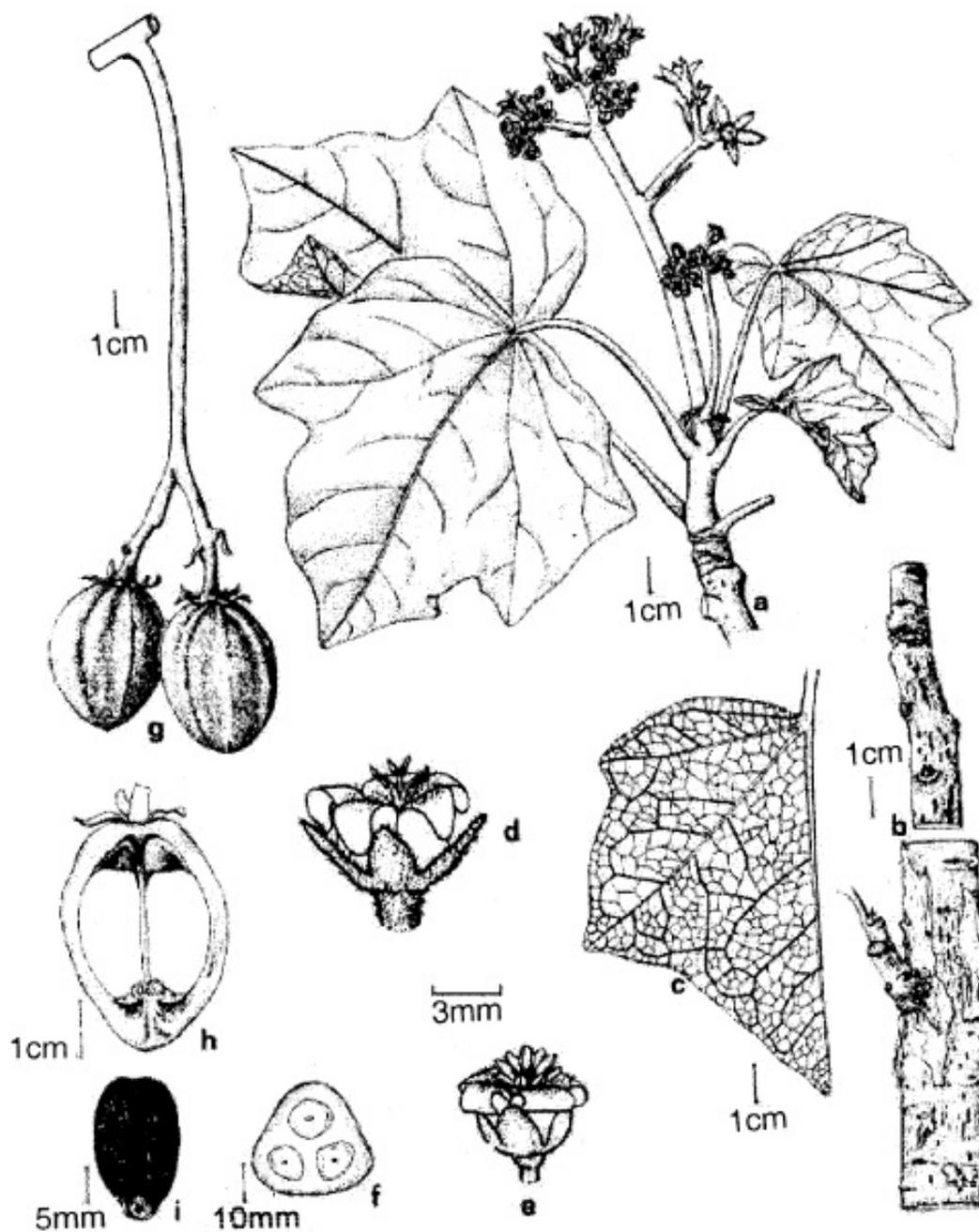


Figura 3-4.: Partes importantes de JCL: a-rama, b-corteza, c-hoja, d-flor pistilada, e-flor estaminada, f-sección transversal de fruta inmadura, g- frutos, h-corte longitudinal del fruto [55, 72].

Los principales atributos conocidos para acoger la JCL en pasíes en desarrollo son: su potencial de producción de biodiesel, un gran contenido de aceite en comparación con otros cultivos para biocombustibles (las semillas de la JCL contienen entre 40 y 60% de aceite) [101, 69, 92, 39, 3, 31], un rápido crecimiento del cultivo, tolerante a la sequía, capacidad de

recuperar diversos tipos de terreno, las plantas pueden crecer sin mucha irrigación e insumos agrícolas, gran resistencia a las plagas y pequeños períodos de gestación [106, 3, 55, 53, 103, 6]. Es por eso que diferentes investigadores de los países en desarrollo como Colombia han mostrado un gran interés en la búsqueda de programas de biocombustible a partir de JCL [73, 74, 31].

3.2.2. Producción de aceite y biodiesel de JCL

El cultivo es el primer paso para la producción de aceite o biodiesel de JCL las principales variables para desarrollar un buen cultivo son el terreno incluyendo las características propias del lugar y las practicas establecidas para la plantación [6]. La JCL se puede cultivar en tierras áridas, aunque da mejores resultados el cultivo en tierras húmedas con una precipitación entre 250 y 300 mm de agua por año. No obstante, el cultivo puede soportar temperaturas extremas, lo cual hace que se adapte bien a diferentes terrenos geográficos [55, 6].

Se ha encontrado que la JCL crece mejor en los suelos arenosos o de grava bien drenados con buena aireación [55, 42]. La profundidad del suelo debe ser de al menos 45 cm [51] y la pendiente de la superficie no debe exceder los 30° [133]. Por otro lado la JCL tiene requerimientos nutricionales bajos, pero el pH del suelo no debe exceder de 9 y en suelos muy ácidos la JCL puede requerir fertilización con Ca y Mg [133]. Con el objetivo de obtener una alta producción de biomasa, el cultivo requiere una alta demanda de nitrógeno y fertilización con fósforo [42].

El segundo paso en la producción de biodiesel de JCL es la extracción del aceite del fruto, la cual se realiza principalmente mediante dos técnicas: mecánica y química [7, 43]. Para la extracción del aceite sin importar la técnica que se utilice, es necesario secar el fruto a una temperatura de 105 °C o al aire libre por tres semanas [6]. Los métodos mecánicos, utilizan generalmente un pistón de compresión o un tornillo compresor [43], los cuales tienen una eficiencia de extracción de 60 a 65 % y de un 75 a 80 % respectivamente [56].

Por otro lado, la extracción química se realiza por medio de reacciones químicas, en las cuales existen diferentes variables que afectan la eficiencia de extracción del aceite, estas variables principalmente son la temperatura y el tiempo de reacción. En este tipo de proceso se han logrado eficiencias de extracción de hasta un 99 % de aceite [125, 53, 55, 6], sin embargo, los tiempos que utilizaron estos procesos fueron superiores a 24 horas, es por esta razón es que los métodos químicos aun no son un proceso viable para la extracción del aceite de JCL [6]. Por otro lado, los residuos generados durante estos proceso pueden ser utilizados como abono orgánico o para la producción de biogás por medio de digestión anaeróbica que alcanza a tener un 70 % de CH₄ [106]

La composición y las características del aceite de JCL encontradas en la literatura se muestran en la tabla **3-1**. Los valores mostrados en esta tabla indican que el aceite de JCL presenta un muy buen poder calorífico inferior, no obstante su principal problema es su alta viscosidad. La literatura también indica que la calidad del aceite depende de la interacción del medio ambiente y de la genética de la planta [66]. Además, se cree también que para obtener una buena calidad de la semilla, y de paso de aceite, las condiciones ambientales tienen un impacto más importante que la genética de la planta [6]. Por último la composición de los ácidos grasos del aceite de JCL está dominado por el ácido oleico en un 42.2% y el ácido linoleico en un 35.38%, mientras que el ácido palmítico y el ácido esteárico solo representan un 14.54 y un 6.3% respectivamente [119, 16].

Tabla 3-1.: Composición y características del aceite de JCL [6, 16, 13]

Característica o composición	Unidad	Rango
Densidad	g/cm ³	0.86-0.933
Poder Calorífico inferior	MJ/kg	37.83-42.05
Punto de fluidez	°C	-3
Punto de inflamabilidad	°C	210-240
Cetano	adimensional	38-51
Viscosidad	cSt	37-54.8
Numero de acidez	mgKOH/g	0.92-6.16
Monoglicéridos	kg/kg*100	1.7
Diglicéridos	kg/kg*100	2.5-2.7
Triglicéridos	kg/kg*100	88.2-97.3
Residuos de carbón	kg/kg*100	0.07-0.64
Contenido de azufre	kg/kg*100	0-0.13

El aceite vegetal de JCL es usado principalmente como materia prima en la producción de biocombustibles líquidos destinados a MCI-EC y en segunda instancia para la producción de jabones, aceites hidráulicos, lubricantes y biocidas [6, 106, 27]. Las principales formas en las que se pueden utilizar este biocombustible de JCL en los MCI son: como aceite puro precalentado o sin calentar, en mezclas de aceite con diésel, como biodiésel y en mezclas de biodiésel con diésel [6].

El biodiésel de JCL se obtiene principalmente mediante el proceso de transesterificación del

aceite de JCL, el cual consiste en una reacción química entre metanol, aceites vegetal y soda caustica, a una presión y temperatura dadas durante aproximadamente 90 minutos [94]. Este proceso es el más usado debido a su alta eficiencia de producción de biodiesel con un mínimo de energía [27]. Otra ventaja de este proceso es que dentro de los productos se encuentra la glicerina la cual es utilizada a gran escala en la industria farmacéutica y cosmética [106]. El biodiesel obtenido a partir del aceite de JCL es adecuado para la utilización como biocombustible ya que satisface los requerimientos técnicos americanos y europeos para su uso en MCI-EC [18, 134], en la tabla **3-2** se observan las principales características y propiedades del biodiesel.

Tabla 3-2.: Composición y características del Biodiesel de JCL respecto al valor de la norma EN 14214:2003 [6, 16, 13]

Característica o composición	Unidad	Rango	EN 14214:2003
Densidad	g/cm ³	0.864-0.88	0.86-0.9
Poder Calorífico inferior	MJ/kg	38.45-41.0	-
Punto de inflamabilidad	°C	170-192	min 120
Cetano	adimensional	50-56.1	min 51
Viscosidad a 30 °C	cSt	4.84-5.65	3.5-5
Numero de acidez	mgKOH/g	0.06-0.5	max 0.5
Monoglicéridos	kg/kg*100	0.24	max 0.8
Diglicéridos	kg/kg*100	0.07	max 0.2
Residuos de carbón	kg/kg*100	0.02-0.5	max 0.3
Contenido de azufre	kg/kg*100	0.0036	max 0.01
Contenido de metil ester %	kg/kg*100	99.6	min 96.5

3.2.3. Pruebas en MCI-EC operados con aceite y biodiesel de JCL

Diversos investigadores en todo el mundo han realizado diversos estudios en MCI-EC de diferentes tipos y a discondiciones de prueba, utilizando como combustible aceite de JCL (AJ) y biodiesel de JCL (BJ) o mezclas de estos con diésel fósil [98]. Las variables más importantes que evalúan los investigadores en estas máquinas son el desempeño, las emisiones específicas y la combustión. Las variables de desempeño analizadas más importantes son el torque, potencia al freno, presión media efectiva al freno, consumo específico de combustible al freno, eficiencia térmica al freno y la eficiencia volumétrica.

Por el lado de las emisiones las más estudiadas son las emisiones las reguladas (CO, CO₂, HC, NO_x y PM) y la temperatura de los gases de escape. Sin embargo en la actualidad se estudian otras emisiones tales como los compuestos volátiles orgánicos y los hidrocarburos aromaticos policiclicos [108]. Por último los parámetros más importantes en los procesos combustión en MCI son la tasa de liberación de calor y la presión en la cámara de combustión.

3.2.4. Desempeño

Las pruebas de desempeño un MCI trabajando con bicomcombustibles buscan que estos tengan el mismo o mejor resultado que si operaran con cualquier combustible fósil. Sin embargo, por las propiedades físico-químicas de los biocombustibles lo que se busca es que estos impacten lo menos posible las diferentes variables de desempeño y además que no se vean afectados los diferentes componentes mecánicos del MCI. A continuación se muestran los resultados de desempeño encontrados en la literatura obtenidos en MCI-EC operando con mezclas de aceite de JCL (AJ) y biodiesel de JCL (BJ) con diésel fósil.

Torque, potencia y presión media efectiva al freno (*BMEP*)

Diferentes pruebas en MCI, trabajando con mezclas de AJ y BJ con diésel, han reportado que se presenta una disminución del torque, la potencia y BMEP cuando este trabaja a diferentes condiciones de carga y régimen de giro que con respecto a cuando trabaja con diésel [107, 70, 75, 100, 33, 64, 86, 102, 87, 88, 105, 117]. Sin embargo, esta reducción en las variables de desempeño es menor en las mezclas de BJ con diésel que con las mezclas de AJ con diésel, incluso se ha comprobado que mezclas de BJ con diésel menores al 30 % en volumen la reducción del torque, la potencia y el BMEP no es significativa en comparación a cuando el MCI trabaja con diésel.

El comportamiento de estas variables se debe a que el biodiesel presenta mejores resultados de combustión, ya que su viscosidad es cercana a la del diésel fósil, mientras que la viscosidad es aproximadamente 15 veces mayor con el AJ y por ende se tiene una pobre atomización de este en la cámara de combustión, lo que conlleva a una pésima mezcla aire combustible provocando un pobre proceso de combustión. No obstante el parámetro que más influye en estos resultados es el bajo poder calorífico del AJ y BJ, los cuales son un 10 % inferiores al del diésel.

Consumo específico de combustible al freno (*BSFC*)

Resultados experimentales en MCI-EC trabajando con mezclas de AJ y BJ con diésel reportan que el BSFC disminuye con el aumento de la carga del MCI operando a una velocidad de giro constante, sin embargo, este parámetro es superior para las mezclas en todo el rango

de carga en comparación con el diésel. También se tiene el mismo comportamiento si se gráfica el BSFC con respecto al torque, potencia y BMEP. Para todos los casos el BSFC es superior para las mezclas de AJ que para las mezclas de BJ con diésel. Además, estos estudios reportan que los mejores resultados de BSFC se obtienen con mezclas de BJ con diésel fósil menores al 30% en volumen [26, 107, 15, 100, 33, 32, 113, 48, 64, 58, 118, 102, 87, 114, 65, 19, 88, 105, 4, 117, 20, 12, 11, 2].

Otros estudios han mostrado que con el uso de aditivos antioxidantes en mezclas de BJ con diésel el BSFC disminuye en todo el rango del carga del MCI, sin embargo, siguen siendo superiores a los resultados del MCI operando con diésel [50, 63]. En general este comportamiento se debe al bajo poder calorífico del AJ y BJ respecto al diésel y a una mayor densidad de estos biocombustibles respecto al diésel, lo que lleva a que el inyector ingrese más masa por ciclo de trabajo en MCI. Otros estudios han modificado los parámetros de inyección del MCI, encontrando que con un adelanto en el tiempo de inyección en 5 grados CAD se logra una reducción en el BSFC, no obstante sigue siendo superior al del diésel. Esta disminución se debe principalmente a que el biodiesel tiene más tiempo de combustión logrando así liberar más energía en el proceso de combustión[45].

Eficiencia térmica al freno (η_{th})

Experimentos realizados en MCI-EC trabajando a diferentes BMEP, potencia al freno o carga para una velocidad de giro constante del MCI muestran que la η_{th} del MCI aumenta logrando su máximo aproximadamente al 75% de carga, no obstante la η_{th} siempre es menor con las mezclas de AJ y BJ con diésel comparado con un motor opera con diésel. Por otro lado, si se compara con el aumento de la velocidad angular de MCI la η_{th} siempre es menor con en el MCI operando con los biocombustibles que operando con diésel [26, 107, 100, 32, 113, 116, 97, 48, 81, 102, 114, 65, 88, 126, 4, 11, 28]. Esta diferencia que se presenta entre el diésel y las mezclas de AJ y BJ con diésel se debe principalmente al incremento en el BSFC que se presenta por la disminución de la potencia neta de salida en MCI trabajando con biocombustibles, a pesar de esto se ha encontrado que de los dos biocombustible los de mejor resultado son las mezclas de BJ [70].

También se ha encontrado que es posible mejorar la η_{th} modificando algunos parámetros del MCI, estos son adelantando el tiempo de inyección, lo que con lleva a un mayor tiempo de combustión y por ende una liberación mayor de energía por parte de las mezclas de AJ y BJ o aumentando la presión de inyección, lo que trae consigo una mezcla más homogénea de aire combustible consiguiéndose así a una mejora en el proceso de combustión. Otra modificación en el motor es aumentando la relación de compresión del MCI, lo que trae consigo un aumento en la potencia de salida para una misma cantidad de masa de combustible inyectada [82, 54, 93]. Además, se ha encontrado que precalentando las mezclas de AJ antes de ser

inyectado presenta mejores resultados de η_{th} ya que con esta acción se reduce la viscosidad de dichas mezclas [25, 12]. Otros estudios han encontrado que con mezclas de metanol y AJ se logra obtener η_{th} similares al diésel, esto puede ser causado por el alto número de cetano del metanol [92, 115].

3.2.5. Emisiones

Las emisiones no solo indican que tan eficiente es el proceso de combustión que desarrolla el MCI, sino que también mide qué tan eficiente energéticamente es el MCI. Por esa razón se desea que algunas emisiones disminuyan tales como el CO, HC, NOx y PM y otra aumente como CO₂, aunque sea una emisión de efecto invernadero. Los resultados obtenidos en emisiones en diferentes MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel se muestran a continuación.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas venenoso incoloro e inodoro que se genera en un MCI como producto de la combustión incompleta del combustible. Este se da cuando no hay suficiente oxígeno, un tiempo adecuado para la finalización de la reacción, una pobre atomización o desigual distribución de combustible a través de la cámara de combustión, lo que conlleva a que un poco de combustible no se queme y algo de carbono termine reaccionando en CO. Esta emisión se considera como indeseable, ya que representa la energía química perdida que no se utilizó plenamente en el MCI [11].

El CO en términos específicos [g/kWh] medidos y calculados en MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel, muestran un comportamiento casi constante en los rangos de 50 a 75 % de carga, presentando sus máximos valores para las cargas de 25 y 100 % [11]. No obstante, para las mezclas de BJ para la carga del 100 % del MCI esta emisión es cerca de un 30 % menor respecto a la emitida por el MCI operando con diésel [116, 126]. Cuando se gráfica con respecto a la potencia de salida, esta emisión tanto para mezclas de AJ y BJ se incrementa para la mayor potencia [97]. Este comportamiento es debido a la combustión incompleta o al exceso de combustible inyectado en la cámara de combustión con lo cual se obtiene una menor relación de aire-combustible.

También han encontrado que el CO medido en % o en ppm aumenta para todas las mezclas de AJ con diésel en todo el rango de carga del motor. Sin embargo, en motores operando con mezclas de BJ con diésel se observa una reducción de CO en comparación que cuando el MCI operando con diésel. No obstante, cuando el motor se encontraba a plena carga y operando con cualquier mezcla de AJ y BJ con diésel, la emisión de CO presenta un incremento súbito, causado principalmente por la disminución de la relación AF. [25, 26, 70, 58, 114, 20, 120].

También se encontró que la emisión de CO es mínima en el régimen de giro óptimo del motor y sus valores máximos se presentan en los puntos de operación más críticos del MCI, sin importar que tipo de mezcla de AJ y BJ se utilice [100, 88, 117, 35, 2]. Por otro lado, el CO presenta un aumento con el incremento de la presión de inyección para las mezclas de AJ con diésel [65]. Una forma de reducir este parámetro para las mezclas de AJ es precalentando el biocombustible antes de ser inyectado en la cámara de combustión [12].

Dióxido de carbono (CO₂)

Los resultados obtenidos en MCI-EC de CO₂ en g/kWh encontrados en la literatura, muestran incrementos de esta emisión en todo el rango carga con el uso de mezclas de AJ y BJ en comparación de la emitida por el motor trabajando con diésel, presentando los mayores valores las mezclas de AJ respecto a las mezclas de BJ. Sin embargo para todos los combustibles disminuyen a medida que aumenta la carga, además si se precalienta el AJ se logra disminuir aun más esta emisión llegando a valores similares a los del diésel [25, 12, 107, 97, 86, 11].

Otros estudios encontraron que el CO₂ medido en % en MCI presenta un aumento de forma lineal con el aumento de la carga, mostrando mayores valores para las mezclas de BJ en comparación con diésel [26]. No obstante, otros autores presentan resultados contradictorios de los niveles de CO₂ con el uso de mezclas BJ en MCI operando a diferentes rpm [32, 102, 117], además se encontró que esta emisión aumenta con el incremento de la presión de inyección del MCI [65]. Este comportamiento en general se debe principalmente a que se lleva a cabo un mejor proceso de combustión, lo cual es debido a la molécula de oxígeno que contiene los biocombustibles de JCL.

Hidrocarburos sin quemar (HC)

Resultados obtenidos en MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel muestran que las emisiones específicas de HC disminuyen con el uso de mezclas de BJ y aumentan con el uso de AJ en comparación con el MCI operando con diésel [11, 126]. En el caso de las mezclas de BJ la disminución se corresponde al mejoramiento del proceso de combustión, caso contrario ocurre para las mezclas de AJ, ya que el incremento en las emisiones de HC se debe principalmente a la alta viscosidad del AJ lo cual acarrea una deficiente inyección de combustible y por ende deficientes procesos de combustión.

Cuando los HC son medidos en ppm en MCI operando con diésel y mezclas de BJ y AJ con diésel, presentan un aumento lineal para todos los combustibles con el incremento del porcentaje de carga, siendo los de menor valor para las mezclas de BJ y los de mayor valor para las mezclas de AJ con respecto al motor operando con diésel [25, 12, 26, 70, 32, 81, 114, 20, 120]. Sin embargo, otros estudios presentan una disminución de HC para mezclas de AJ con el aumento de la carga y la velocidad angular del MCI [131, 117, 35, 2].

Realizando modificaciones en el MCI tales como aumentar la presión de inyección se logra una disminución de este parámetro para las mezclas de AJ [65].

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

A temperaturas bajas existe nitrógeno como una molécula diatómica estable pero con el incremento de la temperatura esta se vuelve reactiva, es por eso que con altas temperaturas y disponibilidad de oxígeno se facilita la producción de NO_x en los procesos de combustión. Cuando se evalúa de manera específica los NO_x en MCI trabajando a diferentes condiciones de carga, potencia y régimen de giro, esta presenta una disminución general en masa con el incremento de la carga para cualquier mezcla de AJ, BJ o diésel. Sin embargo, hay una mayor masa de las mezclas de AJ y BJ respecto a la emisión del diésel para todo el rango de carga en el MCI [116, 97, 46, 126, 4, 11].

Este tipo de comportamiento se debe al aumento de la turbulencia en la cámara de combustión debido a el aumento de la carga, lo que contribuye a un proceso combustión más rápido, lo que lleva a una disminución del tiempo de residencia de la especie en la zona de alta temperatura, por otro lado, el aumento en la emisión con los biocombustibles de JCL también se debe a la presencia de la molécula de oxígeno en su composición química. Otros estudios han intentado disminuir los NO_x con el uso de aditivos, logrando una reducción casi hasta los niveles del MCI operando con diésel [137]. Asimismo, con la utilización de gases de recirculación (EGR) se logra reducir los NO_x, esto se debe principalmente porque se reduce la cantidad de oxígeno disponible en la mezcla aire combustible [112].

Por otro lado, los NO_x medidos en ppm aumentan en el MCI operando con las mezclas de BJ en todo el rango de carga respecto al MCI operando con diésel. Sin embargo, a la máxima carga tienden a disminuir para todos los biocombustibles [26, 107, 32, 81, 114]. No obstante otro estudio muestra que esta emisión aumenta con la carga del motor tanto para BJ como para diésel [131].

Para el caso de las mezclas de AJ con diésel los NO_x medidos en ppm, presentan una disminución respecto al diésel, pero presentan un incremento con el aumento de la carga del motor [82, 70, 88, 120]. Otros autores, encontraron que los NO_x son mayores en todo el rango de velocidad angular respecto al diésel [102, 117, 35]. Sin embargo, con la utilización de aditivos antioxidantes los NO_x se reducen en todo el rango de velocidades del MCI [105]. Por último, otros estudios encontrarón que modificando la presión de inyección y adelantando los tiempo de inyección del MCI los NO_x disminuyen [65, 82].

Temperatura de gases de escape

La temperatura medida de los gases de escape en MCI-EC trabajando con mezclas de AJ y BJ con diésel muestran resultados contradictorios, algunos autores reportan incrementos o disminuciones para similares condiciones de operación del MCI. Sin embargo, diferentes autores coinciden que con las mezclas de AJ la temperatura de los gases de escape tiende a ser inferior comparado a la temperatura medida cuando el MCI opera con mezclas de BJ con diésel [26, 70, 100, 32, 113, 97, 64, 102, 126, 12, 11].

Las bajas temperaturas obtenidas con las mezclas de AJ con diésel se deben a los malos procesos de combustión que tiene lugar con estas mezclas debido a su alta viscosidad, lo que lleva a pobres procesos de atomización del combustible y por ende una mezcla no homogénea aire combustible. Otras investigaciones reportan que adelantando el tiempo de inyección un 5 CAD se consigue un aumento de la temperatura de los gases con el motor operando con AJ, al igual que con el incremento de la presión de inyección [82].

Material Particulado (PM)

El material particulado (PM) esta compuesto principalmente por hollín de carbono, combustible no quemado, aceite lubricante y aerosoles de azufre [4]. Las emisiones reportadas de PM producidas en MCI-EC muestran una disminución en la distribución de PM en número, cuando el motor es operado con mezclas de BJ con diésel, en comparación con el MCI operando con diésel [140].

Otros estudios calculan el PM específico emitido por un MCI-CE operando con mezclas de AJ con diésel mostrando un aumento de esta emisión cuando este trabaja en cargas menores e iguales al 75 % de la potencia máxima de prueba respecto a la emitida por el MCI trabajando con diésel, no obstante los dos disminuyen a medida que se aumenta la potencia de salida, además cuando se llega a la potencia máxima de prueba esta emisión presenta un reducción cuando el MCI es operado con AJ en comparación a cuando es operado con diésel [97].

Estos resultados pueden ser causados por una pobre combustión a bajas cargas. A cargas medias se incrementa la temperatura de combustión con un incremento mínimo de combustible en la cámara de combustión, obteniendo como resultado la oxidación del hollín por los radicales libres OH, lo cual conduce a una reducción del PM. Por otro lado se ha encontrado que con el uso directo de BJ en MCI-CI, la distribución de PM presenta un gran número de partículas en el rango de los 10 a 40 nm mayor que con el diésel [4, 130]. Además el PM específico de las mezclas de BJ disminuyen respecto al diésel para todo el rango de carga de prueba del MCI. [107].

3.3. Desgaste en MCI-EC operando biocombustibles

El uso de aceites vegetales como combustibles en MCI-EC de inyección indirecta o directa provocan una pésima inyección de estos debido a su alta viscosidad, generando así un pobre proceso de combustión, lo cual trae consigo depósitos de carbón en las válvulas, culata y pistones. Cuando el MCI-EC es de inyección directa el inyector presenta taponamientos, causados también por la mala combustión de los aceites vegetales. Por otro lado, el aceite lubricante presenta una degradación mayor, por la dilución parcial del aceite vegetal en el aceite lubricante [78, 77].

Pruebas de duración hechas un MCI-EC operando con una mezcla de biodiésel con diesel al 20 % en volumen, mostraron la presencia de depósitos de carbón, en la culata en la pared superior del pistón, en la punta del inyector. Sin embargo, se encontró que estos depósitos son un 40 % inferiores con el MCI operando con la mezcla de biodiesel que con diésel. El desgaste físico de los componentes móviles del MCI son aproximadamente un 30 % menores en el MCI operando con la mezcla de biodiesel que con diésel [71].

Por otro lado se encontró que la dilución producida en el aceite lubricante del MCI-EC es menor cuando este opera con mezclas de biodiesel con diésel, este puede ser debido a que la dilución de combustible por las paredes de la cámara es menor con el biodiesel ya que como se tiene un proceso de combustión mejor, la cantidad de combustible no quemado es menor que cuando opera con diésel. Además, el biodiesel tiene propiedades de lubricación que ayuda a la protección de los anillos del pistón y las camisas del cilindro, asimismo la mayor viscosidad del biodiesel lleva consigo también a que traspase una menor cantidad de combustible al aceite lubricante, llevando consigo una mejor proyección a la partes móviles del motor [71, 128].

Otros estudios han encontrado que el contenido de cenizas en el aceite lubricante, son un 20 % menores con el uso de biodiesel como combustible en comparación con el diésel [9]. Uno de los estudios más interesantes realizados en los aceites lubricantes fue la estimación del desgaste individual de las partes vitales del motor tales como, pistones, anillos del pistón, camisas de cilindros, etc., estos se realizaron por espectroscopia de absorción atómica en aceites lubricantes, indicando que el combustible biodiesel llevó al menor desgaste de las piezas en movimiento del motor en términos de menor cantidad de desechos metálicos (como Fe, Cu, Zn, Mg, Cr, Pb y Co) presentes en muestras de aceite lubricante [9].

Dichos análisis en los aceites lubricantes demostraron claramente que no sólo las características de rendimiento, sino también las características de desgaste de las piezas móviles son mejores para los sistemas del motor hasta con un 20 % de mezclas de biodiesel con diésel. También se encontró que el desgaste de varias partes vitales se reduce hasta en un 30 %

debido a las propiedades de lubricidad adicionales de biodiesel. Se puede concluir que los combustibles de origen biológico son superiores en rendimiento al desgaste que el diésel fósil [9]

MCI-EC operando con mezclas del 20 % de biodiesel de karanja con diésel (KOME20), fue investigado Dhar y Agarwal en pruebas de durabilidad durante 250 horas [29]. Una inspección visual de los componentes del motor, presentan depósitos de carbono más altos en la parte superior del pistón, culata y punta del inyector. La medición del desgaste físico de los componentes del motor mostró menor desgaste de las válvulas, pistones, anillos de pistón y bielas. No obstante se presentó un mayor desgaste en los cojinetes del extremo de las bielas y muñones [29].

En este mismo estudio se caracterizó también el desgaste de la superficie para ambos combustibles (KOME20 y diésel), la textura de la superficie de camisa del cilindro se mantuvo en condiciones aceptables, incluso después de 250 h de ensayo de resistencia[29]. A pesar de los depósitos de carbono más altos y mayor desgaste de algunos componentes vitales del motor, no se observaron problemas de funcionamiento durante 250 h prueba de resistencia para la mezcla de KOME20 alimentada del motor en comparación con el diésel mineral alimentado motor. Por lo tanto, el biodiesel mezclado en con diésel en proporciones menores al 20 % o inferiores se pueden utilizar MCI-EC sin modificacialguna.Sin embargo, se requiere una mayor investigación detallada del efecto de las propiedades de biodiesel en la composición y la propiedad de degradación del aceite lubricante, así como la combustión del motor, ya que estos factores son los principales responsables de la formación de depósitos de carbón y el desgaste de los diferentes componentes del motor y por lo tanto es de vital importancia para la implementación a gran escala de biodiesel en MCI con éxito. [29].

Otros resultados obtenidos de análisis de aceite lubricante hechos por Kenneth et al. [67], indican que no hay desgaste de metal adicional para mezclas B20, los niveles de hollín en el lubricante fueron significativamente más bajos en vehículos operando con B20 que con diésel. Pero, el filtro de combustible tapado fue el principal problema para los vehículos de prueba, este resultado era causado por la presencia de altos niveles de esteroides vegetales en el biodiesel u otros problemas de calidad del combustible [37]. Por otro lado, se ha mostrado que los costos de mantenimiento del MCI relacionados con el sistema de combustible fueron casi idénticos para ambos grupos (diésel y mezcla de biodiesel) hasta el mes final del estudio. Pero la sustitución de componentes como el inyector y la culata cerca del final del estudio en un bus B20 causaron costes medios de mantenimiento a ser mayor para el grupo B20 (\$0,07 vs. 0,05 por milla) [67].

Fraer et al. [44] evaluó la durabilidad de cuatro furgonetas 1993 Ford Cargo y cuatro tractores Mack 1996 (dos de cada uno que se realizan con B20 y dos con diésel) por 4 años con el fin

de investigar la durabilidad de las piezas del motor. Los resultados obtenidos muestran que se observaron diferencias en el desgaste u otros problemas durante el desmontaje del motor. Sin embargo, los tractores Mack operados con B20 mostraron mayor frecuencia cambio de filtro de combustible y de la boquilla del inyector. No obstante los contaminantes biológicos pueden haber causado los taponamientos en el filtro. Adem, una acumulación de lodos se observó alrededor de los balancines en los motores Mack operado con B20. El lodo contenía altos niveles de sodio, posiblemente causados por la acumulación de jabones en el aceite del motor operado con B20, causados por biodiesel fuera de especificación [44].

Junta Nacional de Biodiesel (NBB) [132] realizó una prueba de durabilidad de 1000 h de duración en motor Cummins NI4 operando con una mezcla B20 de biodiesel de soja. Aunque esta prueba estaba destinado a ser de 1000 h de duración, que tuvo que ser terminado en 650 h debido a un fallo de la bomba del motor, una parte del sistema de combustible. Este fracaso se debió a la acumulación en la bomba de un residuo formado por ésteres de ácidos grasos, ácidos grasos libres, y sales de ácidos. El mismo residuo había conectado un filtro de combustible y la bomba antes de la prueba de durabilidad. Sin embargo los inyectores de combustible estaban en buen estado al final de la prueba. El análisis de aceite no reveló ninguna degradación significativa. Se concluyo que los problemas operacionales experimentados durante esta prueba fueron causados por la inestabilidad de la oxidación del combustible B20.

La Asociación de Minnesota Trucking realizo una encuesta, encontrando que el 62% de 90 flotas manifestaron tener problemas con el filtro de combustible cuando utilizan mezclas de biodiesel [37]. Humberg et al. [59] encuestó la experiencia de las agencias de transporte estatales con el diésel B20 y el diésel fósil. Casi la mitad de las agencias que utilizaron B20 reportó más cambios de filtros de combustible por problemas de taponamiento que cuando utilizaban diésel de fósil. Sin embargo, se observaron pequeñas disminuciones en el consumo de combustible con B20, además no se reportaron cambios notables en la bomba de combustible y durabilidad del inyector de combustible o impactos inusuales en los análisis de aceite del motor.

El taponamiento de los filtros de combustible y la formación de depósitos del motor puede estar relacionado con la formación de insolubles totales. Sin embargo, con el MCI-EC operando con B100 no produce insolubles significativos cuando se analizaron por ensayos de estabilidad de almacenamiento [37]. Esto puede ser debido a la solubilidad de la degradación polar de los subproductos en el biodiesel, pero estos subproductos pueden entonces convertirse en insolubles cuando el biodiesel se mezclan con el diésel que es no polar [37]. La oxidación y la polimerización de biodiesel también han sido reconocidos como causas de la obstrucción del filtro, depósitos de combustible, coque de inyector del inyector y la corrosión [47].

El problema de los taponamientos en filtros se vuelve más grave en climas fríos [30]. A bajas temperaturas, los cristales de parafina comienzan a formarse en el combustible diésel y con la disminución adicional de la temperatura, los cristales de cera se incrementan y en última instancia pueden obstruir los filtros de combustible y los inyectores. Problemas similares también afectan al biodiesel, pero a temperaturas relativamente altas. La temperatura a la cual el combustible diésel comienza a cristalizar se llama el punto de nube [38]. Según Benjumea et al. [22] diésel fósil tiene un punto de nube de alrededor de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que B20 y B100 (basado en biodiesel de palma) tienen puntos de nube de aproximadamente 0 y $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. [37].

4. Desarrollo experimental

Para las pruebas de desempeño y emisiones de MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel de bajo contenido de azufre fue necesario la adecuación, la construcción y el montaje de un banco de pruebas de MCI, debido a que en el laboratorio de motores de combustión interna de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, no contaba para la fecha con un banco que cumpla con los requerimientos para la realización de pruebas de desempeño y emisiones de MCI de encendido por compresión (EC) o de encendido provocado (EP) de alta capacidad. Este capítulo muestra de manera detallada el proceso que se llevó a cabo para la adecuación, construcción y puesta a punto del banco dinamométrico utilizado en las pruebas experimentales, así como el diseño de experimentos realizado para las pruebas, el cálculo de la incertidumbre expandida de los instrumentos de medición, el montaje experimental, la caracterización de los biocombustibles y la descripción de las pruebas experimentales.

4.1. Adecuación y construcción del banco dinamométrico

El proceso de construcción del banco dinamométrico de pruebas, empezó por la adecuación de una planta de generación PUMA de 15 KVA existente en el laboratorio de motores, que no tenía utilidad ya que el generador eléctrico acoplado al motor Lister Petter LPW3 solo podía frenar MCI-EC a una velocidad de 3600 rpm, velocidad a la cual el generador entrega una corriente con la que se obtiene una frecuencia de 60 Hz, frecuencia a la cual las resistencias eléctricas trabajan de manera óptima. Sin embargo, a otras velocidades de giro del MCI el generador no producía dicha frecuencia causando que las resistencias no trabajaran adecuadamente, necesitándose así un banco de resistencia muy robusto para dicha labor, además, la planta no permitía la posibilidad de acoplar otros tipos de MCI para realizar pruebas de desempeño o emisiones.

Con el objetivo de operar el MCI a diferentes regímenes de giro se propuso acoplar un freno hidráulico, el cual permita no solo frenar MCI-EC si no que permita frenar además MCI-SI, se le desacopló el generador y se procedió a diseñar una estructura móvil en la dirección vertical, la cual permita el acople de diferentes MCI con el freno hidráulico de referencia 516-D de la compañía Go Power Systems.

Para realizar esta labor, se debió realizar un proceso de rediseño de la estructura de la planta de generación, seguido de un proceso de diseño y construcción de la mesa de elevación

del freno, adecuación de un sistema hidráulico para el freno y finalmente instrumentación del banco de pruebas. A continuación se procede a describir de manera detallada cada paso mencionado anteriormente.

4.2. Generación de conceptos para la adecuación del banco

El proceso de generación de conceptos de diseño comenzó con un modelo de caja negra, el cual permite conocer todas las entradas y salidas del sistema que se desean para el diseño del banco de pruebas de MCI. Para este caso se tienen las siguientes funciones que debe realizar el diseño:

- Se necesita diseñar una estructura lo suficientemente rígida, que permita soportar los diferentes tipos de esfuerzos causados en la operación del sistema freno-MCI y del motor.
- La estructura diseñada debe quedar perfectamente ensamblada en la estructura de la planta de generación.
- Las vibraciones del banco deben ser mínimas cuando el banco dinamométrico este en operación.
- Se debe diseñar y/o seleccionar los tipos de acoples que se necesitarán para garantizar el perfecto acople de los MCI con el sistema de frenado.
- Se debe diseñar y/o calcular los acoples para los diferentes instrumentos de medición que tendrá el banco de pruebas de MCI.
- El banco dinamométrico debe permitir que el eje de salida del freno se pueda alinear de manera fácil y rápida a diferentes MCI.
- El sistema necesita que tenga un caudal de agua continuo para el funcionamiento del freno.
- El agua de ingreso al freno debe estar a temperatura ambiente y la salida de esta no debe sobrepasar los 80 °C.
- Las variables de torque, velocidad angular, consumo de combustible, flujo de aire y temperatura de refrigeración deben ser adquiridas en tiempo real y deben ser almacenadas para su posterior análisis.

Una vez expuestos cada uno de los postulados mencionados anteriormente en el modelo, se procedió a gráficar el modelo de caja negra, que facilitara encontrar las funciones necesarias para empezar con el diseño del banco de prueba de MCI. En la Figura 4-1 se observa el modelo de caja negra obtenido para este diseño.

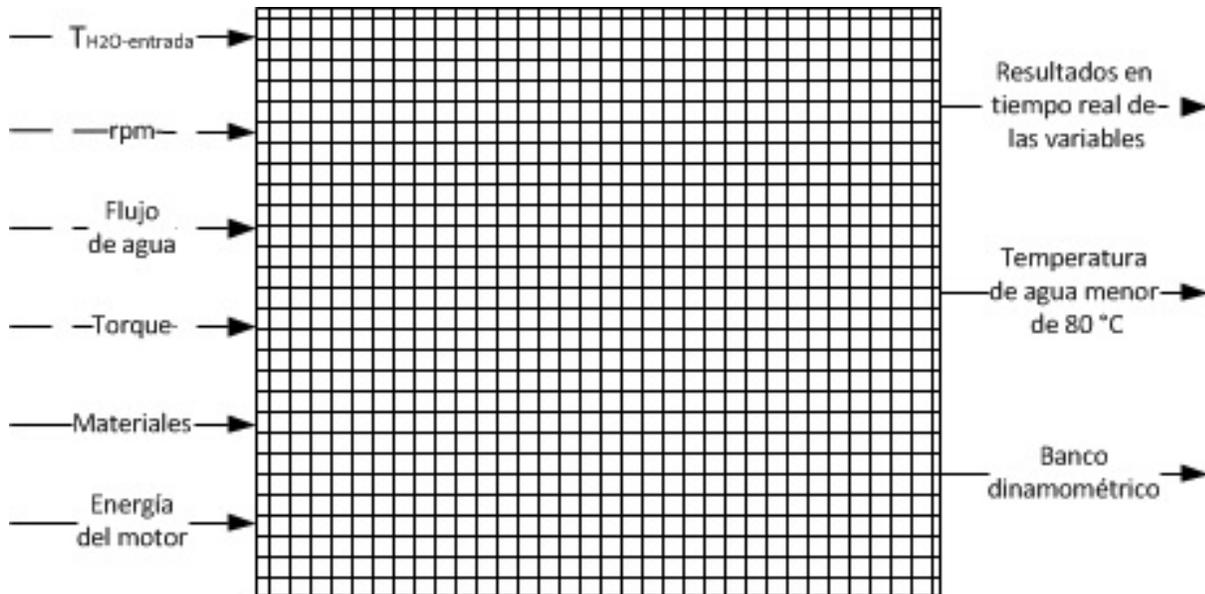


Figura 4-1.: Modelo Caja negra del diseño del banco.

Fuente: Elaboración propia

Con el modelo de caja negra realizado, se procedió a efectuar una subdivisión detallada de los diferentes problemas de diseño, con el objetivo de encontrar las funciones necesarias para darle solución a todos los problemas con los que cuenta el prototipo. Estas funciones se muestran en el modelo de caja gris, donde las variables más importantes se agrupan según las funciones necesarias. En la Figura 4-2 se puede observar el modelo de caja gris para el diseño del banco de pruebas de MCI.

Con los conceptos obtenidos en los modelos de caja negra y gris se procede a una lluvia de ideas tal y como lo recomienda la literatura [136], con el objetivo de dar solución a cada concepto. Una vez hecho esto se procede a realizar el diseño conceptual y de detalle de los elementos que conformaran el banco dinamométrico. En la Figura 4-3 se pueden observar los conceptos obtenidos para llevar a cabo el diseño de detalle de los elementos que conformaran la estructura que soportara el freno hidráulico, el torquímetro y el sistema de acoplamiento del banco de pruebas para MCI.

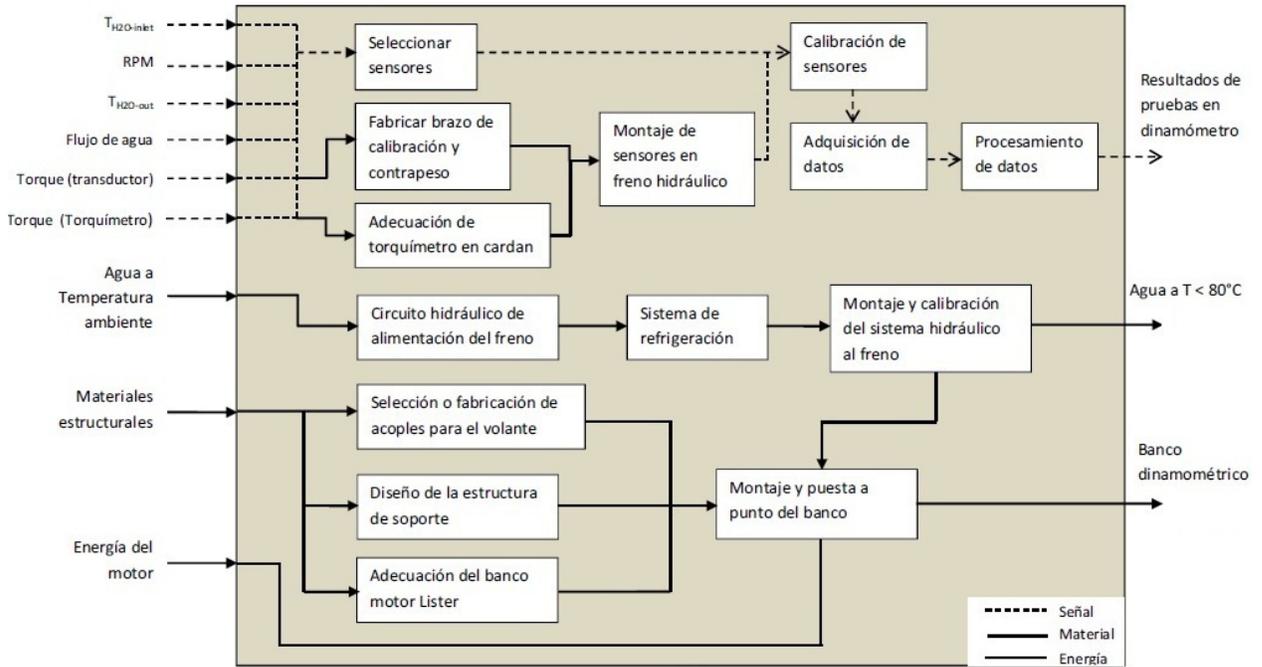


Figura 4-2.: Modelo Caja gris para el diseño del banco dinamométrico de pruebas para MCI.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-3.: Conceptos para el diseño de la estructura del freno hidráulico.

Fuente: Elaboración propia

Con los conceptos de diseño del sistema hidráulico obtenidos en la caja gris se procede a realizar el diseño conceptual de este sistema, el cual se puede apreciar en la Figura 4-4. Como se observa en esta Figura el sistema de refrigeración del sistema hidráulico se descartó, ya que con un sistema de almacenamiento de agua, esta se refrigera hasta el punto óptimo para la operación del freno.

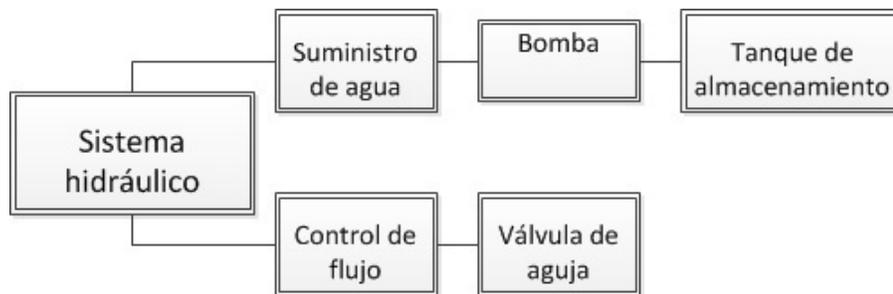
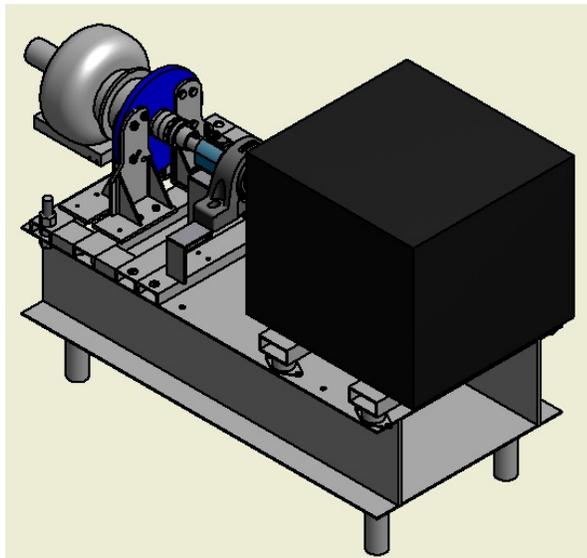


Figura 4-4.: Conceptos para el diseño del sistema hidráulico.

Fuente: Elaboración propia

Con el diseño conceptual ya culminado, se procedió al diseño de detalle y generación de planos CAD para la construcción y el montaje de los elementos mecánicos que conforman el banco dinamométrico. En la Figura 4-5 a y b se observa el modelo CAD y el resultado final obtenido.



(a)



(b)

Figura 4-5.: Diseño CAD del banco dinamométrico (a) y resultado final del banco dinamométrico (b).

Fuente: Elaboración propia

4.3. Motor, instrumentación y equipos de medición

El proceso siguiente a la adecuación, construcción y montaje del banco dinamométrico, consistió en la instrumentación del MCI y en el montaje de los equipos de medición de gases, esto con el objetivo de poder medir las variables necesarias para el cálculo del desempeño y las emisiones específicas al freno obtenidas en las pruebas.

4.3.1. Motor

El MCI-EC utilizado para las pruebas experimentales es un Lister Petter de referencia LPW3, el cual fue diseñado para generación eléctrica. esto quiere decir que fue concebido para trabajar a velocidad rotacional constante. Sin embargo, en las pruebas experimentales el motor fue trabajado a diferentes regímenes de velocidad. Las características principales del MCI-EC utilizado en las pruebas experimentales se muestran en la tabla 4-1.

Tabla 4-1.: Características del MCI

Motor	LPW3
Número de cilindros	3
Tipo de inyección de combustible	Directa
Presión de inyección	200 kPa
Aspiración	Natural
Volumen de desplazamiento	1,395 L
Relación de compresión	18,5:1
Refrigeración	Agua

El motor de pruebas LPW-3 fue diseñado, para cumplir la norma de regulación de emisiones de escape de la Unión Europea (EU) etapa 3A para motores diésel estacionarios, Tabla 4-2

Tabla 4-2.: Norma de emisiones para motores diésel estacionarios EU Etapa 3A

Emisión	unidad	valor
CO	g/kWh	5.5
HC+Nox	g/kWh	7.5
PM	g/kWh	0.6

4.3.2. Instrumentación y equipos de medición

La Figura 4-6 muestra las diferentes variables a medir y los instrumentos de medición necesarios para realizar dichas medidas. Por otro lado, la adquisición de señales provenientes de los instrumentos de medición se realizó por medio de una tarjeta de adquisición de datos y el almacenamiento de estos se realizó por medio del software Labview de la compañía National Instruments (®).

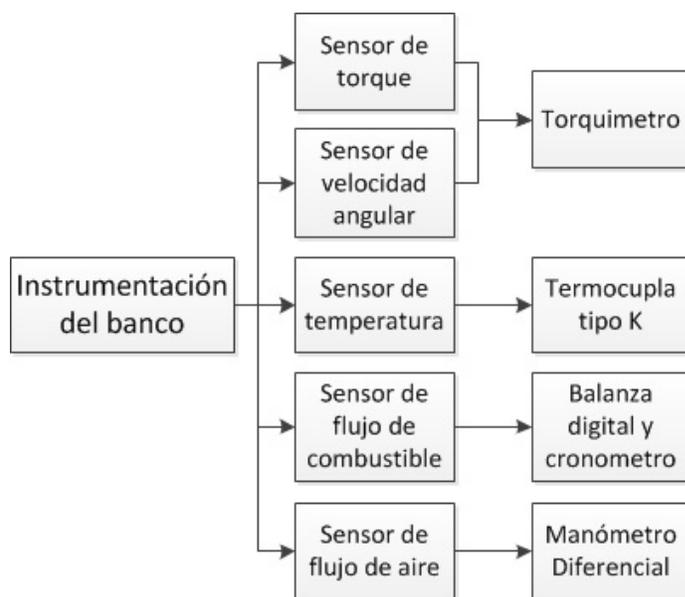


Figura 4-6.: Variables de medición y equipos de medición utilizados en las pruebas experimentales

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-7 muestra las emisiones reguladas generadas en el MCI-EC y los instrumentos de medición necesarios y utilizados para realizar estas medidas.

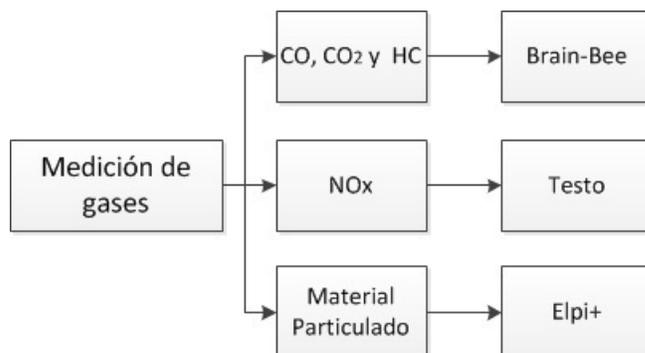


Figura 4-7.: Emisiones y equipos de medición de gases utilizados para las pruebas experimentales

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Características de los equipos de medición

La Tabla 4-3 muestra las características principales de todos los instrumentos de medición, analizadores de gases y contador de partículas utilizados en las pruebas experimentales desarrolladas en este trabajo de investigación.

Tabla 4-3.: Equipos de instrumentación instalados en el banco dinamométrico

Equipo	Referencia	Marca	Resolución
Torquimetro	4520A1000	Kistler	$\pm 1\text{Nm}$
Termocupla	Tipo K	-	$\pm 1,5\text{ K}$
Fluke	51	Fluke	$\pm 1\text{ K}$
Balanza digital	HN	BBG	$\pm 1\text{ gr}$
Tarjeta de adquisición	6212	N-I	$\pm 2,71\text{ mV}$
Laminar Flow Element	50MW20	Meriam	-
Manómetro diferencial	DT-8890	CEM	$\pm 0,001\text{ psi}$
Analizador de gases	AGS-688	Brain-Bee	$\pm 0,01\% \text{ CO}$, $\pm 0,1\% \text{ CO}_2$ $\pm 1\text{ ppm HC}$
Analizador de gases	350	Testo	$\pm 1\text{ ppm NO}_x$
Contador de partículas	Elpi+	Dekati	-

Fuente: Elaboración propia

4.4. Puesta a punto del banco de pruebas de MCI

La puesta a punto del banco se llevó a cabo realizando pruebas con el MCI operando con diésel comercial, la cual es una mezcla en volumen del 7% de biodiesel de palma y 93% de diésel fósil. En estas pruebas, se midieron variables tales como torque, velocidad angular del eje del MCI, flujo de aire, temperatura de los gases de escape, temperatura de refrigeración y consumo de combustible.

Los resultados de estas pruebas sirvieron para calibrar todos los instrumentos de medición y verificar el correcto funcionamiento de estos para las pruebas experimentales. En el anexo A se observan la curva de calibración del LFE (laminar flow element) instrumento para la medición del flujo de aire y en el anexo B los resultados de las pruebas desarrolladas para encontrar los puntos óptimos de operación del MCI, los cuales corresponden a los puntos de máximo torque del motor.

4.5. Matriz experimental

Para el desarrollo de las pruebas se tomó un diseño de experimentos factorial, tal y como se indica en la literatura [83, 90, 139], en donde las variables controladas fueron: las mezclas de los biocombustibles de JCL (MBJ), la velocidad angular del eje del motor en rpm (RPM) y la carga del motor en porcentaje (C-MCI). Los niveles de estas variables se muestran en la Tabla 4-4. Por otro lado, además de las variables mencionadas anteriormente, existen otras variables de entrada, que son: las condiciones atmosféricas de presión, temperatura y humedad relativa del lugar de la prueba. Sin embargo, estas no se tienen en cuenta como variables de entrada debido a que en el desarrollo de las pruebas permanecen constantes o su variación es despreciable. En el anexo C se pueden observar los valores de las condiciones atmosféricas obtenidos en las pruebas experimentales.

Tabla 4-4.: Niveles de las variables controlables

Variable	Niveles										
MBJ	AJ0	AJ20	AJ10	AJ7	AJ5	AJ3	BJ20	BJ10	BJ7	BJ5	BJ3
RPM	1900	2200	2500								
C-MCI	100 %	75 %	50 %	25 %							

Fuente: Elaboración propia

Las variables de salida obtenidas durante las pruebas fueron: torque al freno, presión diferencial del aire de admisión, emisiones de CO, CO₂, HC, NO_x y MP, temperatura de gases de escape y consumo de combustible. Con estas variables de salida se procedió a diseñar la matriz experimental de las pruebas. En las Tablas 4-5 y 4-6, se puede observar como quedaron configurados los experimentos para las pruebas de desempeño y emisiones de un MCI operado con mezclas de AJ y BJ.

Como se observa en las tablas 4-5 y 4-6 se realizaron un total de 128 pruebas con 3 replicas por cada prueba. Para cada replica experimental se verificaba que el MCI se mantuviera es-

table en la condición seleccionada, prestando atención a que la dispersión de absolutamente todos los parámetros de entrada controlables no fueran superiores al 10 % [83].

Tabla 4-5.: Diseño experimental para las mezclas de AJ con diésel

Carga	Combustible															
	AJ20		AJ10		AJ7		AJ5		AJ3		AJ0					
	Velocidad Angular (x 100 rpm)															
	22	19	22	25	19	22	25	19	22	25	19	22	25	19	22	25
100 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
75 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
25 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-6.: Diseño experimental para las mezclas de BJ con diésel

Carga	Combustible															
	BJ20		BJ10		BJ7		BJ5		BJ3		BJ0					
	Velocidad Angular (x 100 rpm)															
	22	19	22	25	19	22	25	19	22	25	19	22	25	19	22	25
100 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
75 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
25 %	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas se realizan de acuerdo a lo indicado en las tablas 4-5 y 4-6, ya que se desea conocer el comportamiento de todas las variables de salida con el MCI operando con las diferentes mezclas de AJ y BJ con diésel, bajo diferentes condiciones de carga y velocidad rotacional.

4.6. Incertidumbre de las mediciones

De acuerdo a lo indicado en la bibliografía la inexactitud y la resolución finita son las fuentes más importantes de incertidumbre de los equipos de medición [139]. Siguiendo el procedimiento de cálculo descrito en [21] se deducen las incertidumbres expandidas por equipo, con lo cual se obtiene un intervalo de confianza del 95 %. En la Tabla 4-7 se encuentran los valores obtenidos para cada instrumento de medición.

Tabla 4-7.: Incertidumbre expandida calculada para cada instrumento de medición

Torquimetro	$\pm 0,93275$ Nm
Fluke	$\pm 1,2064$ K
Balanza digital	$\pm 1,8587$ gr
Tarjeta de adquisición	$\pm 0,578$ V
Manómetro diferencial	$\pm 0,002$ psi
Analizador de gases Brain-Bee	$\pm 0,01591$ % para CO
	$\pm 0,13219$ % para CO ₂
	$\pm 1,8612$ ppm para HC
Analizador de gases Testo	$\pm 2,7979$ para NO _x

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla 4-7, los valores de incertidumbre de todos los instrumentos de medición de las pruebas, están dentro de los intervalos de confianza de los resultados obtenidos.

4.7. Montaje experimental

El montaje experimental desarrollado para las pruebas se puede observar de manera detallada en la Figura 4-8.

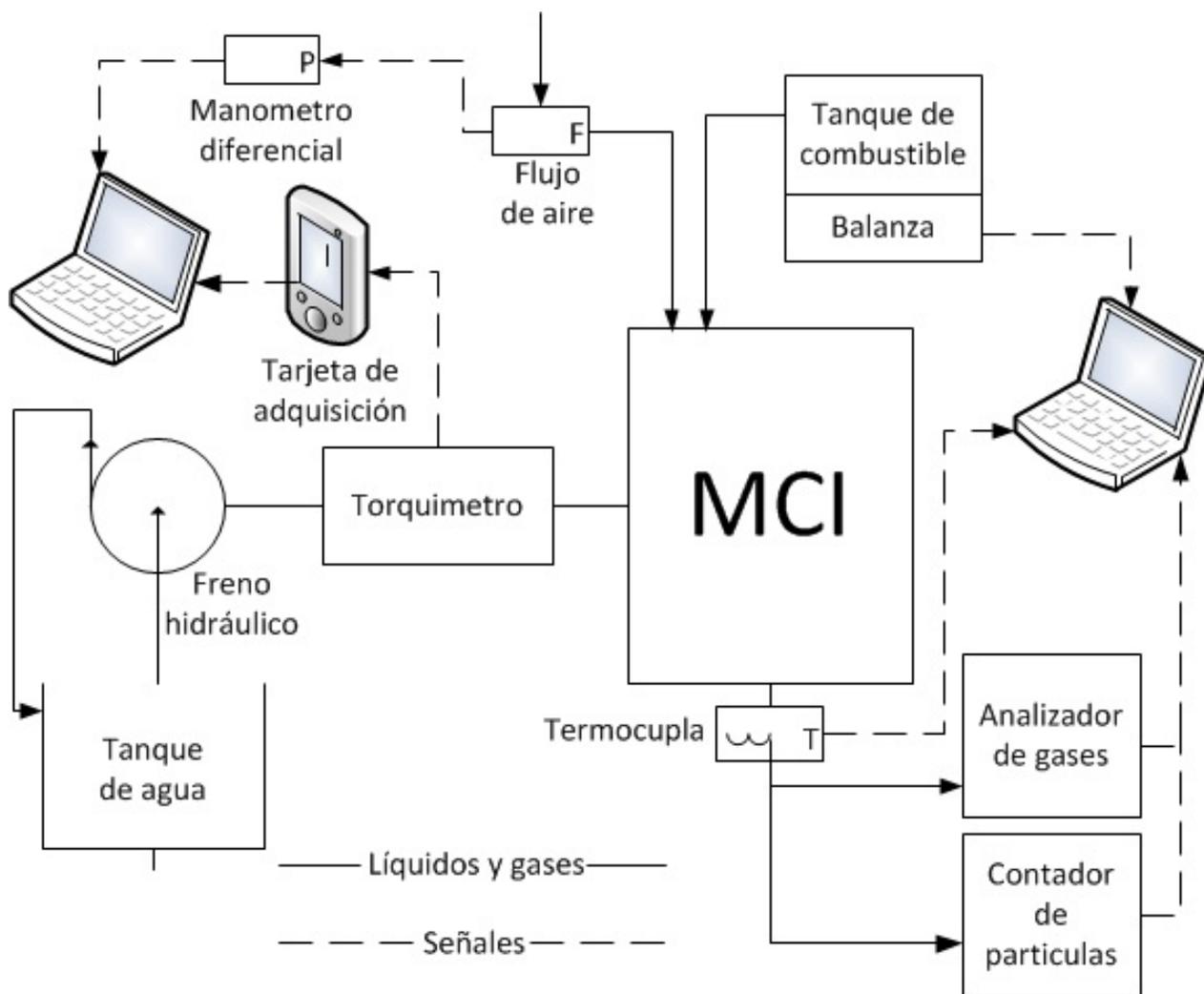


Figura 4-8.: Montaje experimental

Fuente: Elaboración propia

4.8. Caracterización de los biocombustibles

La preparación de las mezclas de AJ y BJ con diésel fósil de bajo contenido de azufre (5 ppm), se llevaron a cabo con probetas de vidrio calibradas de 200 ml con una incertidumbre de $\pm 4\text{ml}$. Las mezclas que se realizaron fueron en proporciones del 3, 5, 7, 10 y 20% en volumen tanto para las mezclas de AJ con BJ con diésel.

Las propiedades físico-químicas de los biocombustibles de JCL y del diésel se obtuvieron en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. En la Tabla 4-8 se muestran los valores obtenidos de las propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales. Por otro lado, la Tabla 4-9 muestra el poder calorífico inferior

y la diferencia energética en magnitud y en porcentaje de las mezclas de AJ y BJ con diésel respecto al diésel.

Tabla 4-8.: Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales

Propiedades	Unidad	Diésel	BJ	AJ
Densidad	kg/m ³	830	880	890
Poder Calorífico inferior	MJ/kg	45.34	39.03	38.81
Viscosidad a 20 °C	cSt	1.85	4.97	38.39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-9.: Diferencia energética en magnitud y en porcentaje de las mezclas respecto al diésel.

Combustible	Poder Calorífico inferior [MJ/kg]	Diferencia energética en magnitud [MJ/kg]	Diferencia energética porcentual [%]
Diésel	45.34	0	0
AJ3	45.14	-0.20	-0.432
AJ5	45.01	-0.33	-0.720
AJ7	44.88	-0.46	-1.008
AJ10	44.69	-0.65	-1.440
AJ20	44.03	-1.31	-2.880
BJ3	45.15	-0.19	-0.418
BJ5	45.02	-0.32	-0.696
BJ7	44.90	-0.44	-0.974
BJ10	44.71	-0.63	-1.392
BJ20	44.08	-1.26	-2.783

Fuente: Elaboración propia

4.9. Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas se llevaron a cabo inicialmente operando el MCI-EC a 100, 75, 50 y 25 % de carga a las tres condiciones de velocidad rotacional y para todas las mezclas de biocombustibles de JCL planteadas en la matriz experimental que se muestra en la Tabla 4-4, con el objetivo de obtener los parámetros de torque y eficiencia volumétrica para cada condición de operación del motor.

Posteriormente, se procedió a trabajar con la mezcla de AJ con la cual se obtuvo el menor torque de salida en el motor (blanco), esto con el fin de medir las otras variables de desempeño (consumo específico de combustible al freno y eficiencia térmica al freno) y la totalidad de las emisiones específicas al freno para las cuatro condiciones de carga y los tres regímenes de giro.

Una vez realizadas las pruebas con el blanco, se llevó a cabo el mismo procedimiento con las otras mezclas de AJ con diésel, continuando con el orden de las mezclas mostrado en la matriz experimental de la Tabla 4-5. Sin embargo, la evaluación de los parámetros de desempeño y emisiones reguladas de las mezclas se realizaron a las mismas condiciones de presión media efectiva al freno y velocidad angular obtenidos con el blanco, con el objetivo de comparar las diferentes variables medidas.

Una vez hechas todas las mediciones en el MCI-EC operando con mezclas de AJ con diésel, se procedió a realizar las pruebas en el motor, pero operando con las mezclas de BJ con diésel, con las cuales se realizó el mismo procedimiento descrito previamente para las mezclas de AJ con diésel. La Figura 4-9 presenta el diagrama de flujo de manera detallada de las pruebas hechas durante este trabajo de investigación.

Una vez terminados todos los experimentos de desempeño y emisiones reguladas de las mezclas de AJ y BJ con diésel, se procede a evaluar el desgaste de las piezas mecánicas del motor. Para esto, se realiza una inspección visual de diferentes piezas y sistemas como la culata, pistones, válvulas y sistema de suministro de combustible del MCI. Además, en el transcurso de las pruebas de desempeño y emisiones se verificaba constantemente el correcto funcionamiento el sistema de suministro de combustible debido a que este era el más susceptible a daños causados por la alta viscosidad del aceite de JCL.

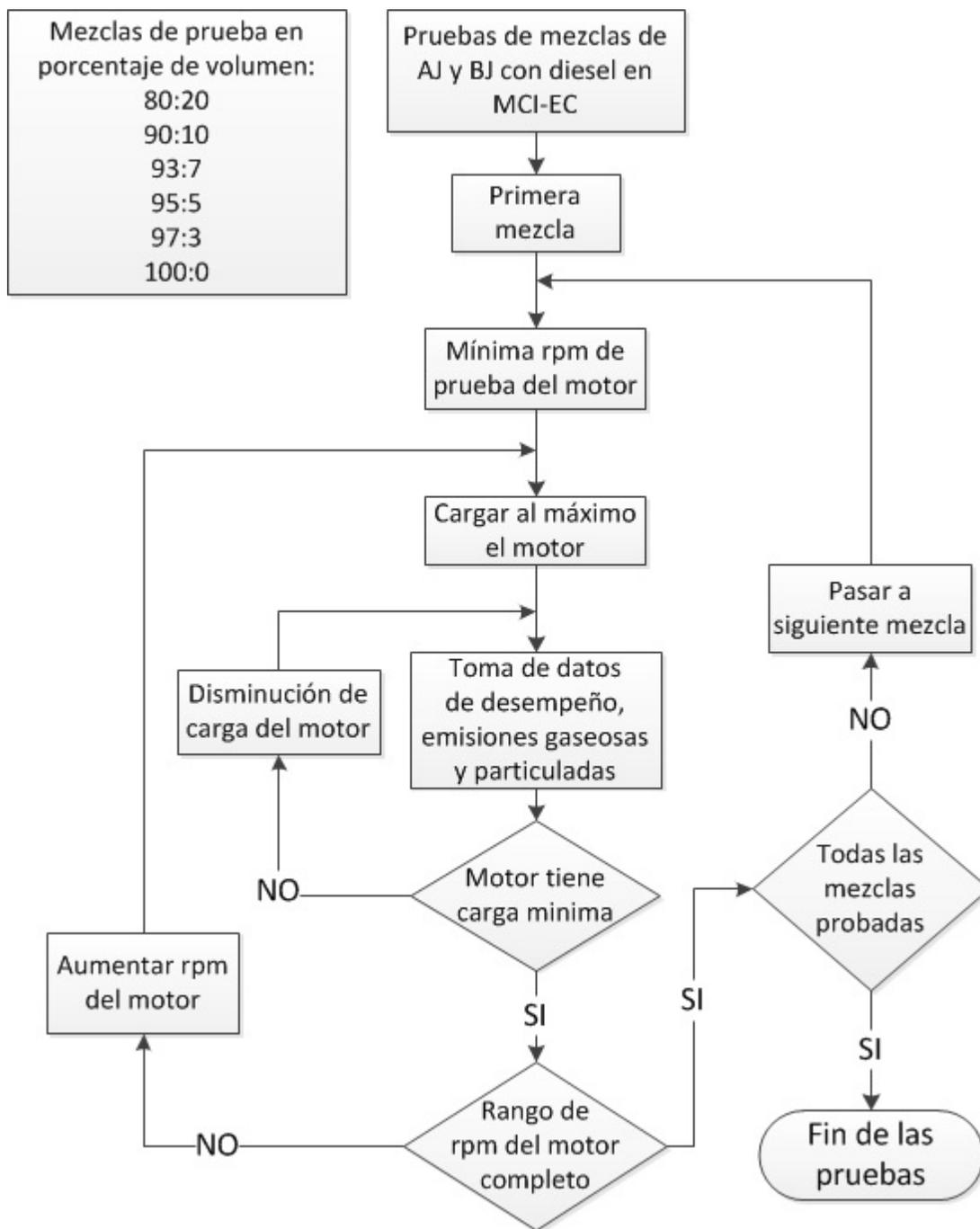


Figura 4-9.: Diagrama de flujo del plan experimental.

Fuente: Elaboración propia

5. Resultados y análisis

Este capítulo presenta los resultados de los diferentes parámetros de desempeño y emisiones específicas al freno, obtenidos de manera experimental en un MCI-EC operado con mezclas de AJ y BJ con diésel fósil a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá.

5.1. Desempeño en MCI-EC operando con mezclas de AJ y BJ con diésel

En esta sección se presentan los resultados obtenidos experimentalmente de las variables de desempeño tales como torque, eficiencia volumétrica, consumo específico de combustible al freno y eficiencia térmica al freno del MCI-EC.

5.1.1. Torque

Las Figuras 5-1, 5-2 y 5-3 muestran los resultados de torque conseguidos en el MCI operando a los tres regímenes de giro y las cuatro condiciones de carga. Como se observa en la Figura 5-1 (a) y (b) el torque logrado por el motor operando a 2500 rpm es mayor para las mezclas de BJ en promedio un 2.53, 1.63, 2.62 y 6.43 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga respectivamente en comparación con los resultados obtenidos con las mezclas de AJ. Similar comportamiento se presentó en el MCI operando a 2200 rpm Figura 5-2 (a) y (b), donde se obtuvo un torque con las mezclas de BJ superiores a las mezclas de AJ en 4.49, 2.39, 7.69 y 7,3 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga. En la Figura 5-3 (a) y (b) se observa el torque alcanzado por el MCI operando a 1900 rpm. A esta velocidad rotacional se presenta un comportamiento para el torque del MCI análogo a los dos regímenes de giro anteriores, obteniendo un torque superior en 1.21, 2.21, 3.41 y 7.88 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga con las mezclas de BJ en comparación con las mezclas de AJ. Esta disminución de torque con las mezclas de AJ también fue encontrada por diferentes autores [33, 117, 77], los cuales indican que se debe principalmente a la alta viscosidad del AJ, ya que causa problemas en el proceso de combustión y por ende no se aprovecha toda la energía disponible del combustible.

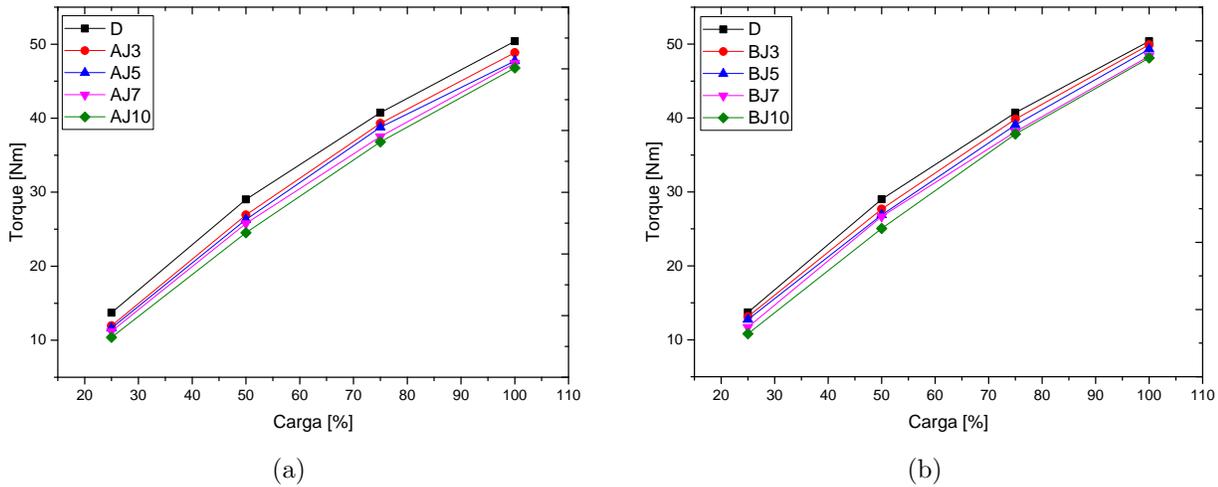


Figura 5-1.: Torque a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se observa que para cualquier mezcla de AJ y BJ con diésel a cualquier condición de carga, el torque es menor que el obtenido por el diésel. Esto se debe principalmente al bajo poder calorífico de las mezclas biocombustibles, esta diferencia de LHV se puede observar en la Tabla 4-9.

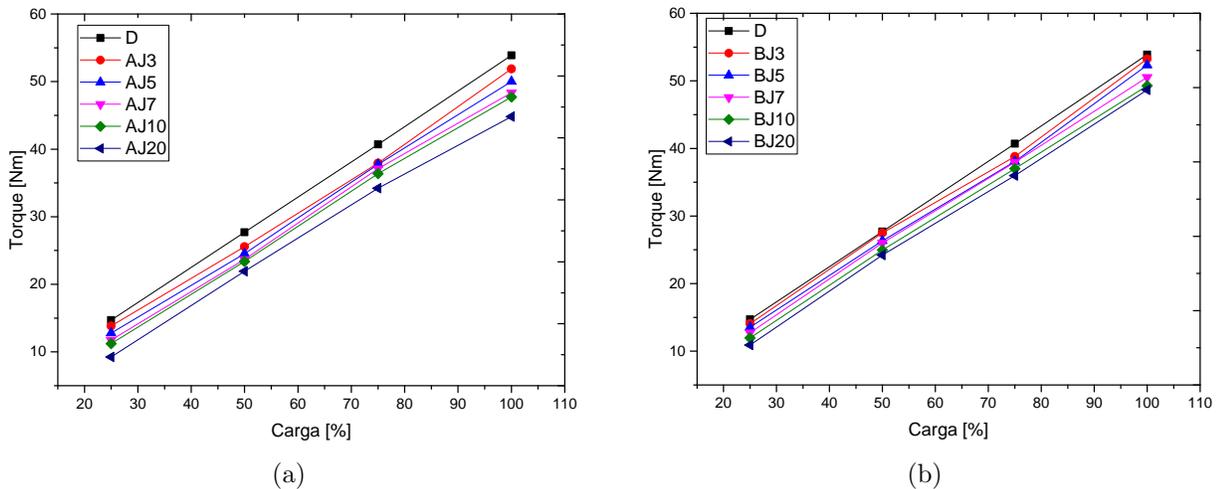


Figura 5-2.: Torque a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 5-1, 5-2 y 5-3 se puede apreciar que la disminución de torque, es en promedio de 3.8 Nm (11.8%) para la mezcla del 10% de BJ con diésel a todas las condiciones

de carga y régimen de giro respecto al torque obtenido con el MCI operando con diésel, similares resultados se encontraron en la literatura [107, 87, 88, 105]. También se observa que la velocidad de giro en la que se observa el mayor torque entre los tres regímenes de giro analizados es 1900 rpm, corroborando con esto que el punto óptimo de operación del motor está cercano a los 1800 rpm (ver anexo B). Por último se observa que para mezclas menores al 5 % de AJ el torque del motor para las tres velocidades rotacionales y las cuatro condiciones de carga solo disminuye en promedio 3 Nm (8.7 %) respecto del torque logrado por el motor operando con diésel.

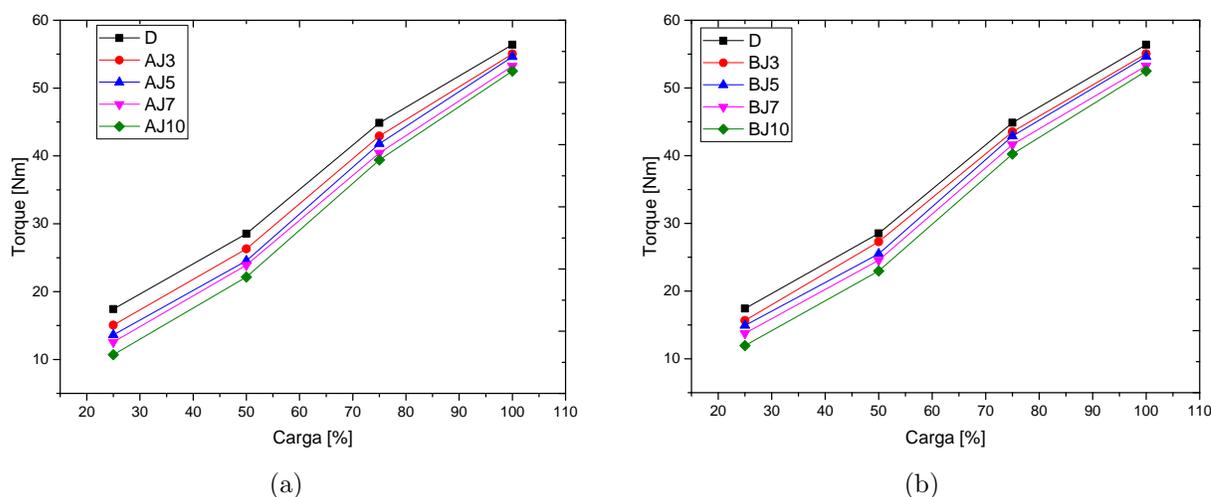


Figura 5-3.: Torque a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Consumo específico de combustible al freno

Los resultados obtenidos de BSFC logrados por el MCI-EC operando a las cuatro condiciones de carga y tres regímenes de giro se observan en las Figuras 5-4, 5-5 y 5-6. Como se observa en las tres figuras se presenta un incremento del BSFC con el aumento del porcentaje de AJ y BJ en la mezcla con diésel, coincidiendo con el comportamiento del BSFC reportado en la bibliografía [26, 107, 15, 100, 33, 32, 113, 48, 64, 58, 118, 102, 87, 114, 65, 19, 88, 105, 4, 117, 20, 12, 11, 2].

El aumento del BSFC evidenciado en estas pruebas para las mezclas de AJ y BJ respecto al diésel con el motor operando a 2500 rpm, en promedio es del 17 % para AJ3, 4 % para BJ3, 23.3 % para AJ5, 14.5 % para BJ5, 26.7 % para AJ7, 18.5 % para BJ7, 34.6 % para AJ10 y 27.2 % para BJ10, Figura 5-4 (a) y (b).

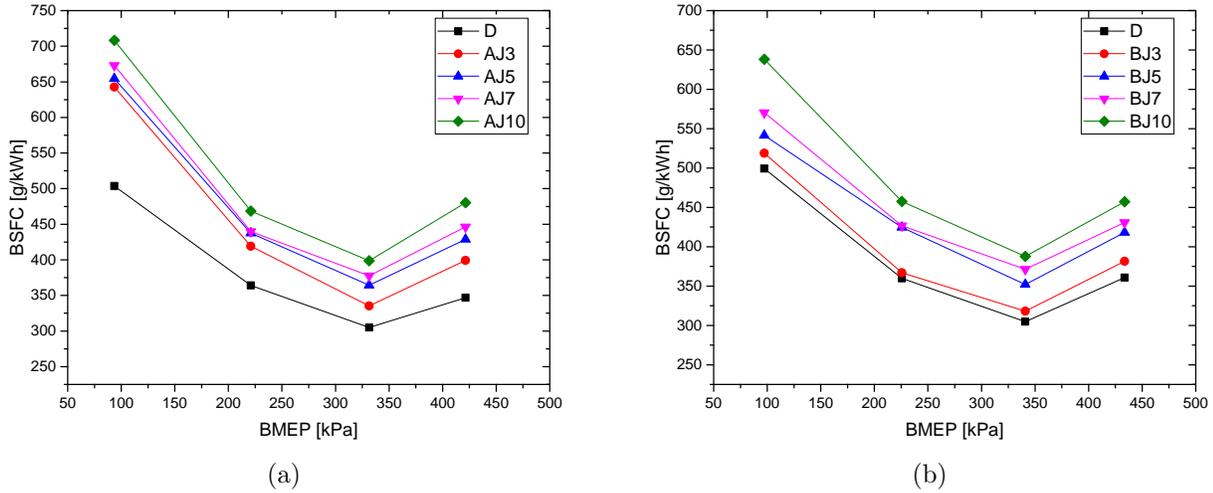


Figura 5-4.: BSFC a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-5 (a) y (b) también se presenta un aumento del BSFC para las mezclas de AJ y BJ respecto al diésel con el motor operando a 2500 rpm. El incremento en promedio es del 14.2 % para AJ3, 10.8 % para BJ3, 25.1 % para AJ5, 20 % para BJ5, 34.9 % para AJ7, 28.9 % para BJ7, 43.2 % para AJ10, 38.8 % para BJ10, 72.6 % para AJ20 y 49 % para BJ20

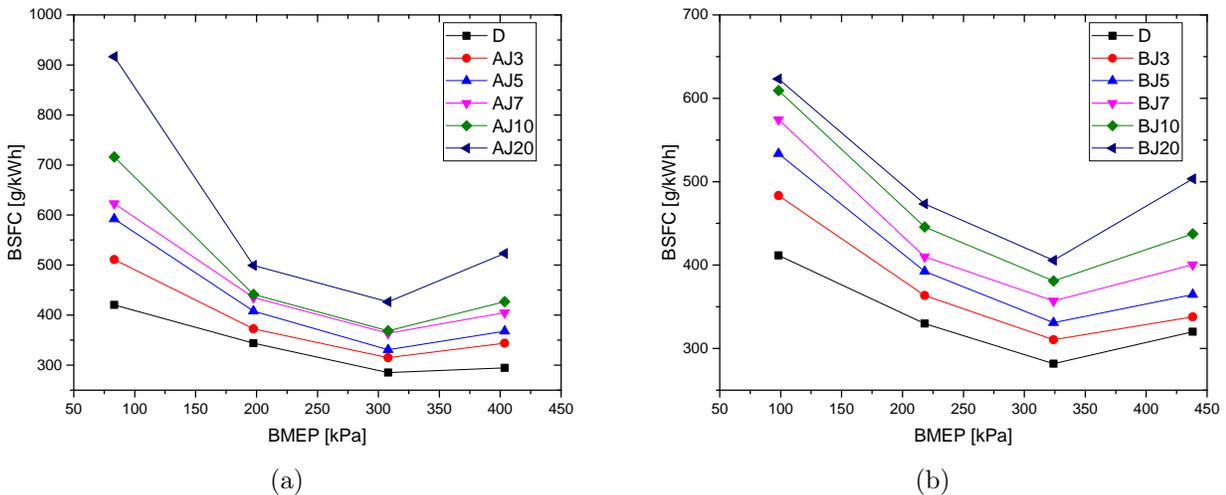


Figura 5-5.: BSFC a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-6 (a) y (b) presenta el comportamiento del BSFC obtenido en el MCI operando a 1900 rpm con las mezclas de AJ y BJ. Como en los dos casos anteriores se evidencia un

incremento del BSFC del 13.1 % para AJ3, 6.2 % para BJ3, 29.9 % para AJ5, 16.6 % para BJ5, 39.4 % para AJ7, 30.3 % para BJ7, 44.8 % para AJ10 y 37.2 % para BJ10 en comparación con los resultados hallados con el MCI operando con diésel.

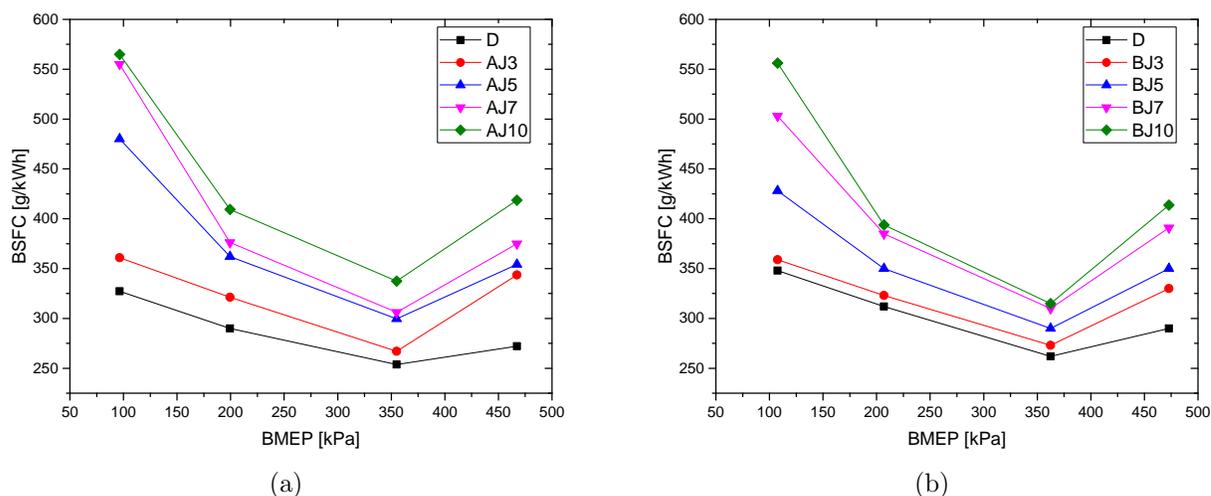


Figura 5-6.: BSFC a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en los resultados mostrados previamente el BSFC del motor a cualquier condición de carga y velocidad rotacional es menor con las mezclas de BJ en comparación con las mezclas de AJ. El comportamiento del BSFC en las pruebas se debe principalmente a que el LHV de los biocombustibles es menor respecto al del diésel (Tabla 4-9) y a la mayor densidad de los biocombustibles de JCL (Tabla 4-8) en comparación con la densidad del diésel, lo que conlleva una mayor cantidad de masa en el interior del motor para desarrollar la misma potencia de salida.

5.1.3. Eficiencia térmica al freno

La Figura 5-7 presenta la eficiencia térmica al freno obtenida en el MCI operando a 2500 rpm para las mezclas de AJ con diésel (a) y para las mezclas de BJ con diésel (b), en esta figura se observa que la η_{th} en promedio es menor para las mezclas de AJ respecto al diésel en 12.9 % para AJ3, 17.4 % para AJ5, 18.4 % para AJ7 y 22.6 % para AJ10. También se aprecia una reducción de η_{th} para las mezclas de BJ de 3.2 % para BJ3, 10.2 % para BJ5, 14.2 % para BJ7 y 19.3 % para BJ10 en comparación con la η_{th} alcanzada por el MCI operando con diésel.

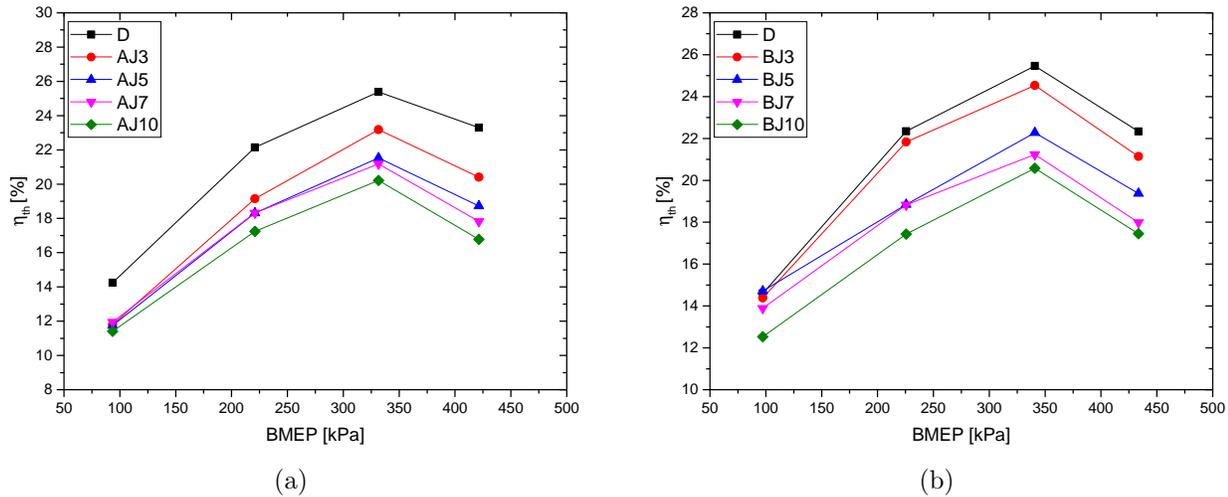


Figura 5-7.: Eficiencia térmica al freno a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 5-8 y 5-9 (a) y (b) presentan los resultados de η_{th} obtenidos en el motor operando 2200 y 1900 rpm con las mezclas de AJ y BJ. Como se observa en estas Figuras el comportamiento de la η_{th} para las mezclas de AJ y BJ exhiben una tendencia similar a la reportada con el motor operando a 2500 rpm.

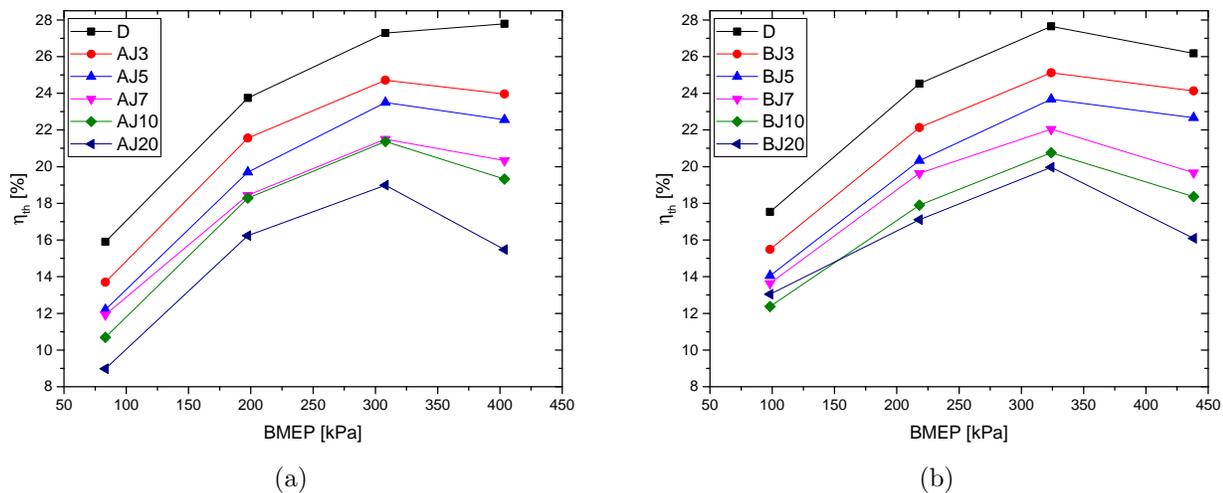


Figura 5-8.: Eficiencia térmica al freno a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

En promedio las diferencias de η_{th} de las mezclas de AJ y BJ respecto a las obtenidas por el diésel estuvieron en un rango entre 7.5 y 25 % para las mezclas de AJ y entre 4.5 y 24.2 %

para las mezclas de BJ a 1900 rpm; a 2200 rpm los valores conseguidos de η_{th} estuvieron entre 11.6 y 37.5 % para las mezclas de AJ y 9.6 y 30.5 % para las mezclas de BJ.

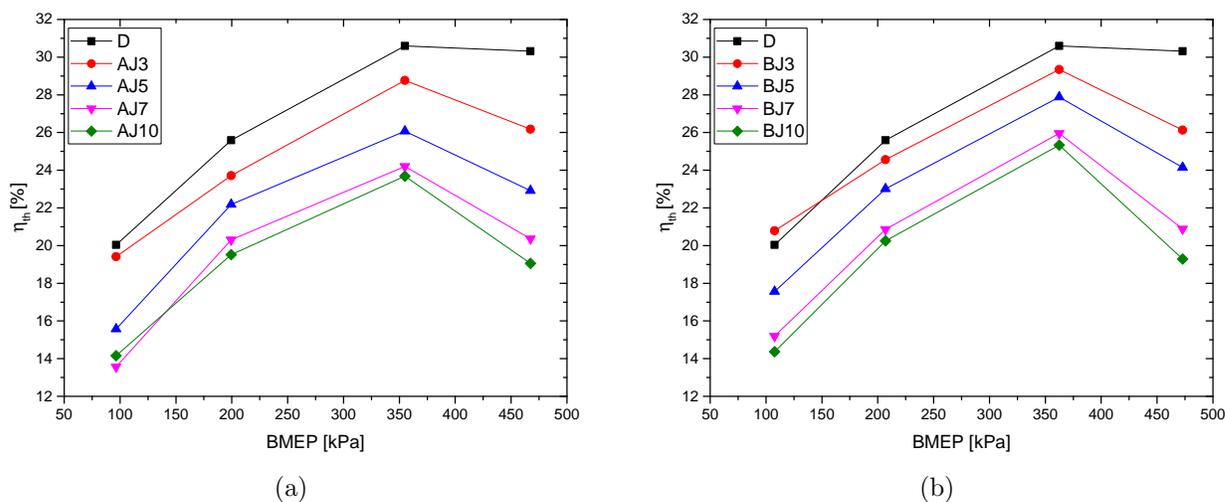


Figura 5-9.: Eficiencia térmica al freno a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de eficiencia térmica al freno son los esperados y concuerdan con los resultados reportados en la literatura [26, 107, 100, 32, 113, 116, 97, 48, 81, 102, 114, 65, 88, 126, 4, 11, 28]. Este comportamiento de eficiencia térmica al freno se debe a que con los biocombustibles de JCL se obtiene una salida de energía menor (BP) en cada régimen y condición de carga del MCI con un consumo específico de combustible mucho más alto respecto al conseguido con el motor trabajando con diésel. Por otro lado, de los resultados mostrados previamente los valores más altos de η_{th} se presentan con las mezclas de BJ. lo que también es reportado en la literatura [70]. Se observa además que sin importar el tipo de mezcla y el régimen de giro, el punto donde se encuentra la eficiencia térmica más alta es al 75 % de carga que es donde el motor entrega la máxima potencia de salida con el mínimo consumo de combustible.

5.1.4. Eficiencia volumétrica

Las Figuras 5-10, 5-11 y 5-12 muestran el comportamiento de la eficiencia volumétrica obtenida en el MCI operando a las velocidades rotacionales y condiciones de carga establecidas para las pruebas. Los resultados muestran que la η_{vol} se incrementa para las mezclas de los dos biocombustibles en comparación con los resultados de η_{vol} alcanzados por el diésel. En promedio este incremento fue de 5.2, 4.7 y 6.9 % para mezclas de AJ y de 3.1, 2.4, y 4.1 % para mezclas de BJ a 1900, 2200 y 2500 rpm respectivamente.

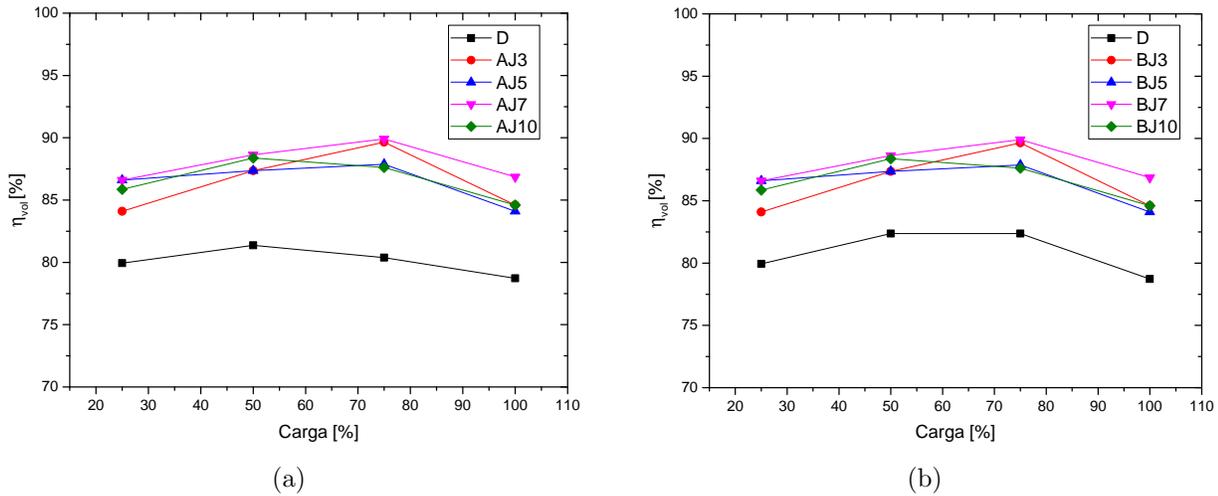


Figura 5-10.: Eficiencia volumétrica a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en los resultados anteriores, la eficiencia volumétrica es mayor para las mezclas de AJ y BJ. Este comportamiento se atribuye a la mayor temperatura en la cámara de combustión que se obtiene con el uso de estas mezclas, llevando consigo que el aire se caliente en el múltiple de admisión y por ende disminuya su densidad, teniendo como consecuencia que ingrese una menor cantidad de masa de aire en la cámara de combustión del MCI. Estos resultados experimentales de eficiencia volumétrica conseguidos, coinciden con los reportados en la literatura [70, 61, 76].

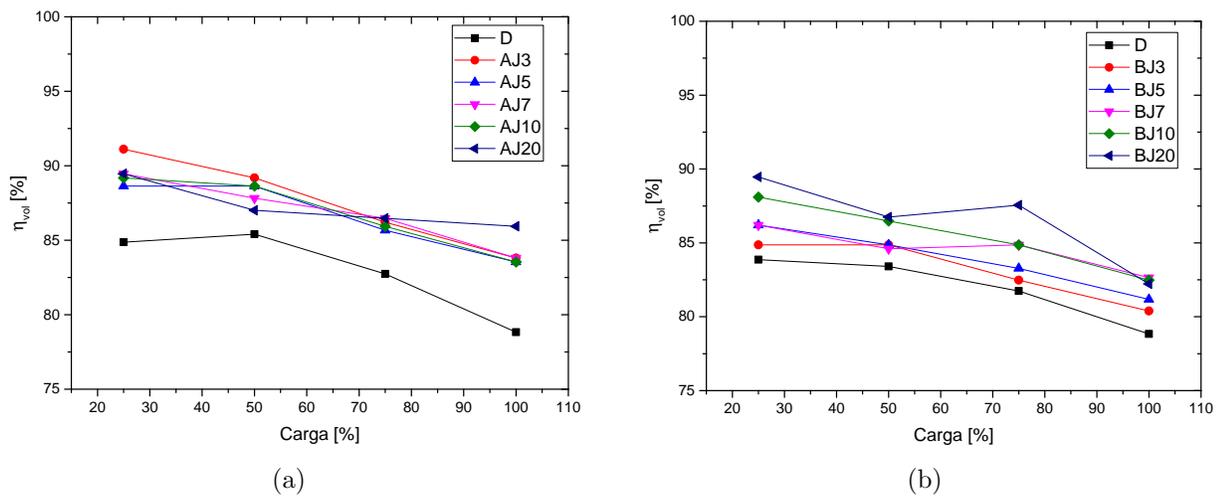


Figura 5-11.: Eficiencia volumétrica a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

El leve incremento de eficiencia volumétrica reportado con el uso de los biocombustibles de JCL se debe principalmente a la molécula de oxígeno presente en estos biocombustibles [61], la cual suple el oxígeno carente en los procesos de combustión realizados en la ciudad de Bogotá.

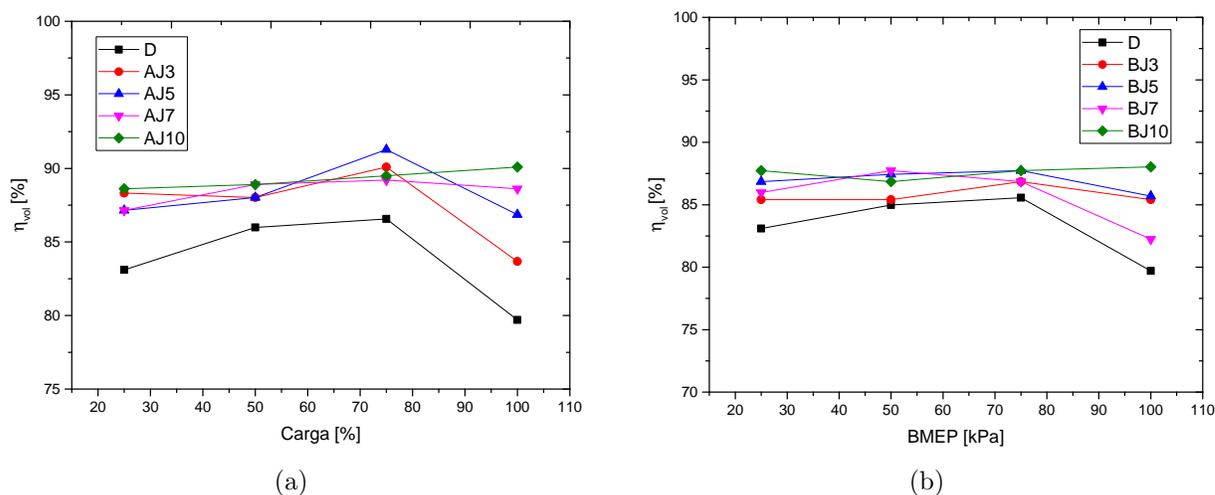


Figura 5-12.: Eficiencia volumétrica a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.2. Emisiones

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente en el MCI operando con biocombustibles de JCL de temperatura de gases de escape, BSCO, BSCO₂, BSNO_x y BSMP.

5.2.1. Temperatura de gases de escape

Las Figuras 5-13, 5-14 y 5-15 (a) y (b) se aprecia que para todas las condiciones de carga y de régimen de giro del motor la temperatura de gases de escape se incrementa para los dos biocombustibles de prueba. En promedio este aumento se encuentra entre 3 y 18 K a 2500 rpm, 11 y 23 K a 2200 rpm y 12 y 27 K a 1900 rpm para las mezclas de AJ respecto a la temperatura de gases obtenida con el motor operando con diésel. Con las mezclas de BJ con diésel se obtuvo una temperatura de gases mayor en el MCI respecto a las obtenidas con el motor operando con diésel, estos valores se encuentran entre 12 y 41 K a 2500 rpm, 7 y 55 K a 2200 rpm y 18 y 51 K a 1900 rpm. Como se observa en los resultados previos la temperatura de gases obtenida por las mezclas de BJ son mayores que las obtenidas por las mezclas de AJ para cualquier condición de operación del MCI. La literatura indica que el incremento en la temperatura de los gases de escape con las mezclas de AJ y BJ son

causados por un incremento en la liberación de calor y por procesos de combustión más largos [26, 70, 100, 32, 113, 97, 102, 126, 11].

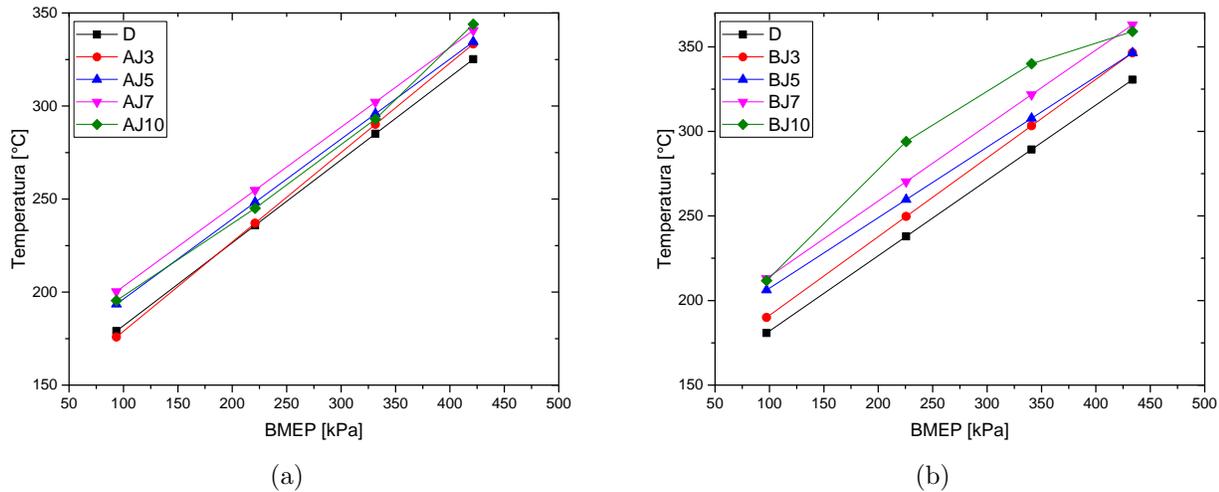


Figura 5-13.: Temperatura de gases de escape a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 5-13, 5-14 y 5-15 (a) y (b) muestran también que la temperatura de gases obtenida con el MCI operando con diésel son menores para cualquier condición de BMEP y régimen de giro. Este comportamiento se debe al mayor LHV del diésel (Tabla 4-9) lo que genera que el MCI requiera de menos esfuerzo para llegar a las condiciones de carga experimentales.

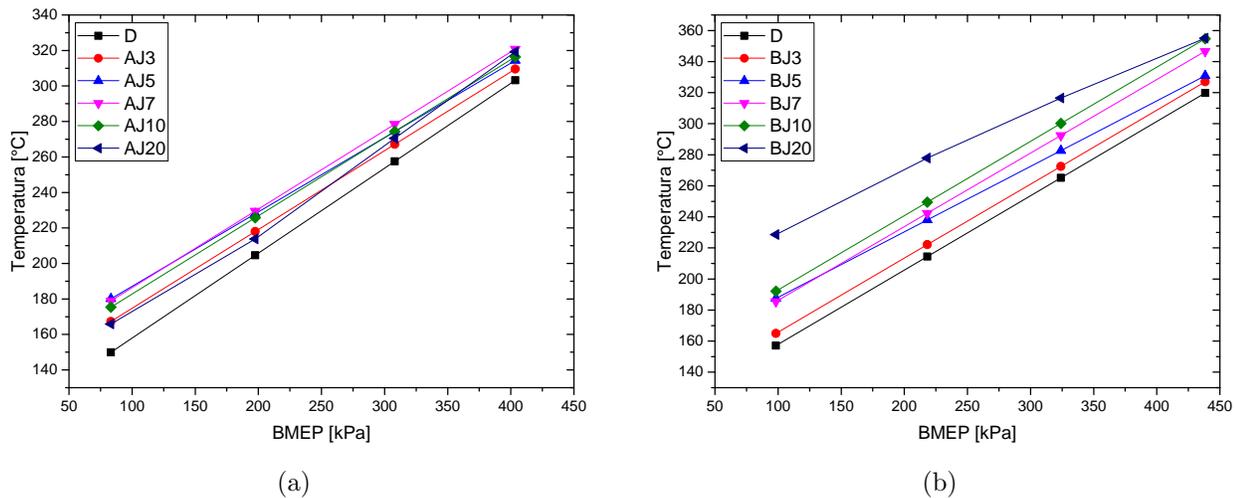


Figura 5-14.: Temperatura de gases de escape a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado el AJ a pesar de tener también oxígeno en su molécula no presenta buenas características de combustión debido a su alta viscosidad, que repercute en una pobre atomización del combustible, razón por la cual no se observan cambios apreciables en la temperatura de gases de escape del MCI con respecto a cuando este opera con diésel [12].

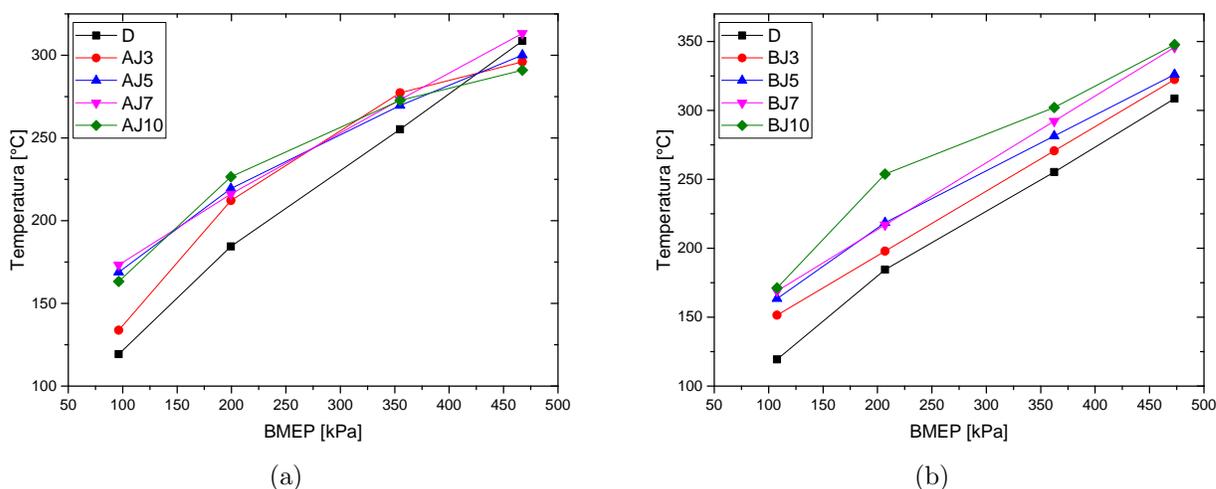


Figura 5-15.: Temperatura de gases de escape a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Emisión específica de Dióxido de carbono

Las Figuras 5-16, 5-17 y 5-18 muestran los resultados hallados de BSCO₂ del MCI operando con los biocombustibles de JCL a los tres regímenes de giro y las cuatro condiciones de carga. Como se observa en la Figura 5-16 (a) y (b), el BSCO₂ obtenido en el motor operando a 2500 rpm es mayor para las mezclas de AJ en promedio un 4.5, 2.76, 7.59 y 12.39 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga respectivamente en comparación con los resultados obtenidos con las mezclas de BJ.

Análogo comportamiento se obtuvo en el MCI operando a 2200 rpm, Figura 5-17 (a) y (b), donde se obtuvo un BSCO₂ con las mezclas de AJ superiores a las mezclas de BJ en 6.72, 2.15, 9.6 y 8.62 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga. En la Figura 5-18 (a) y (b) se observa el BSCO₂ obtenido en el MCI operando a 1900 rpm. En esta Figura se aprecia una tendencia similar a los dos regímenes de giro del MCI anteriores, las diferencias de BSCO₂ entre las mezclas de AJ y BJ corresponden a 8.61, 10.19, 9.13 y 20.14 % a 100, 75, 50 y 25 % de carga.

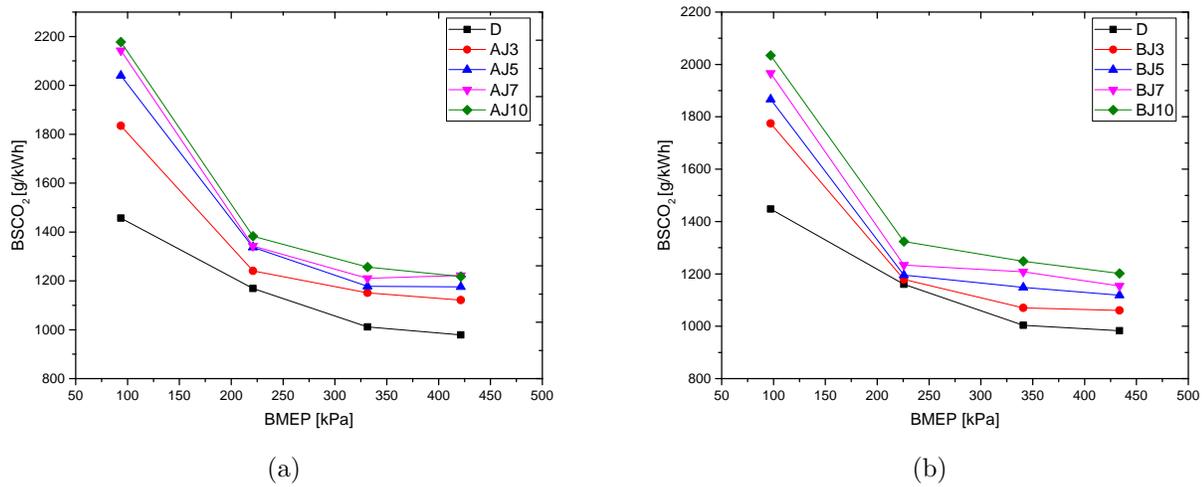


Figura 5-16.: BSCO₂ a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Esta tendencia en del BSCO₂ con las mezclas de AJ y BJ , también fue hallada por diferentes autores, quienes indican que el incremento en esta emisión se debe principalmente a la molécula de oxígeno presente en la composición química de los biocombustibles de JCL, lo cual permite que en el proceso de combustión el carbono tenga más oxígeno disponible para reaccionar y formar CO₂ [25, 12, 107, 97, 86, 11].

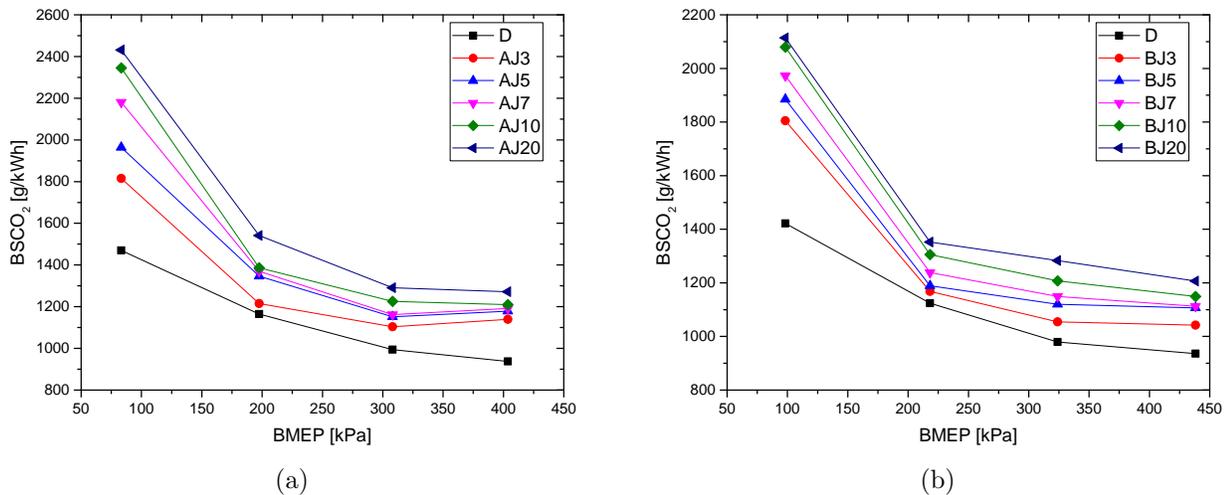


Figura 5-17.: BSCO₂ a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Es interesante observar que el BSCO₂ para las mezclas de AJ es mayor que para las mezclas

de BJ en todas las condiciones de operación del MCI, este comportamiento se debe principalmente a que la emisión en % obtenida para las dos biocombustibles es relativamente la misma pero la potencia de salida del MCI obtenida con mezclas de AJ es inferior en comparación con la obtenida con las mezclas de BJ. Comportamiento causado por las diferencias de LHV entre los dos biocombustibles e indica que el motor opera más eficientemente trabajando con las mezclas de BJ con diésel ya que produce una mayor potencia para una misma emisión de CO₂.

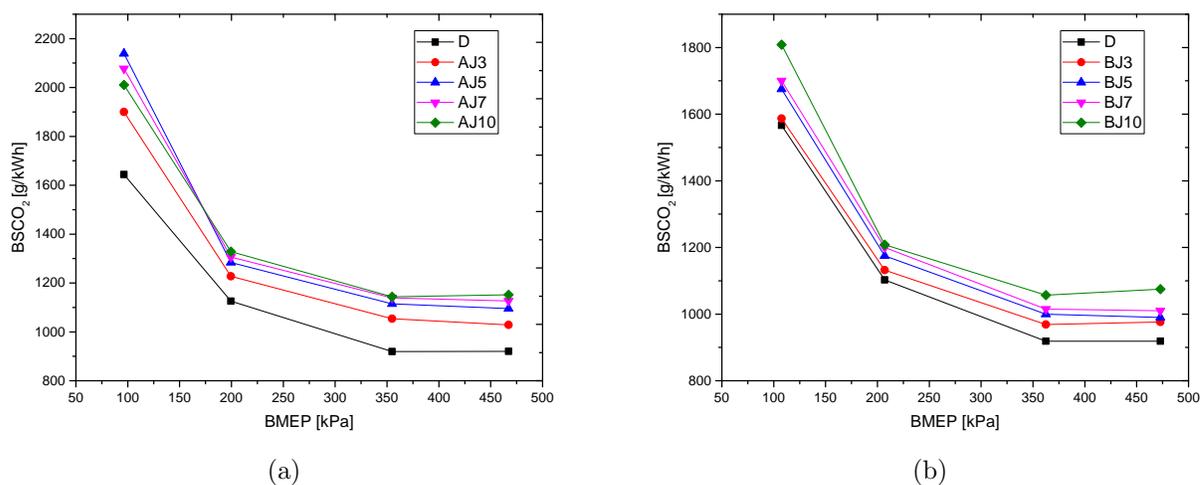


Figura 5-18.: BSCO₂ a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Emisión específica de óxidos de nitrógeno

Las Figuras 5-19, 5-20 y 5-21 (a) y (b) muestran el comportamiento de la emisión específica al freno de NO_x obtenida en el MCI-EC operando con las mezclas de biocombustibles de JCL a las condiciones experimentales establecidas. En estas figuras se puede observar que el BSNO_x se incrementa para todas las condiciones de carga del motor con el uso de las mezclas de BJ con respecto al obtenido en el MCI operando con el diésel en 28.5, 55.3 y 70.3 % para BJ3, 30, 62.8 y 106.6 % para BJ5, 45.5, 87.7 y 122.5 % para BJ7 y 96.2, 137.3 y 138.5 % para BJ10 a 2500, 2200 y 1900 rpm respectivamente.

Como se aprecia en los resultados anteriores el incremento de BSNO_x, se da con el aumento del contenido BJ en la mezcla y con la disminución de las rpm del motor. Estos resultados de BSNO_x coinciden con los reportados por varios autores [116, 97, 46, 126, 4, 11]. La literatura indica que la disminución de los BSNO_x con el aumento de carga se debe al incremento de la turbulencia en la cámara de combustión, lo cual contribuye con un proceso de combustión más rápido, llevando consigo un menor tiempo de residencia de las especies en la zona de

alta temperatura evitando que se formen NOx.

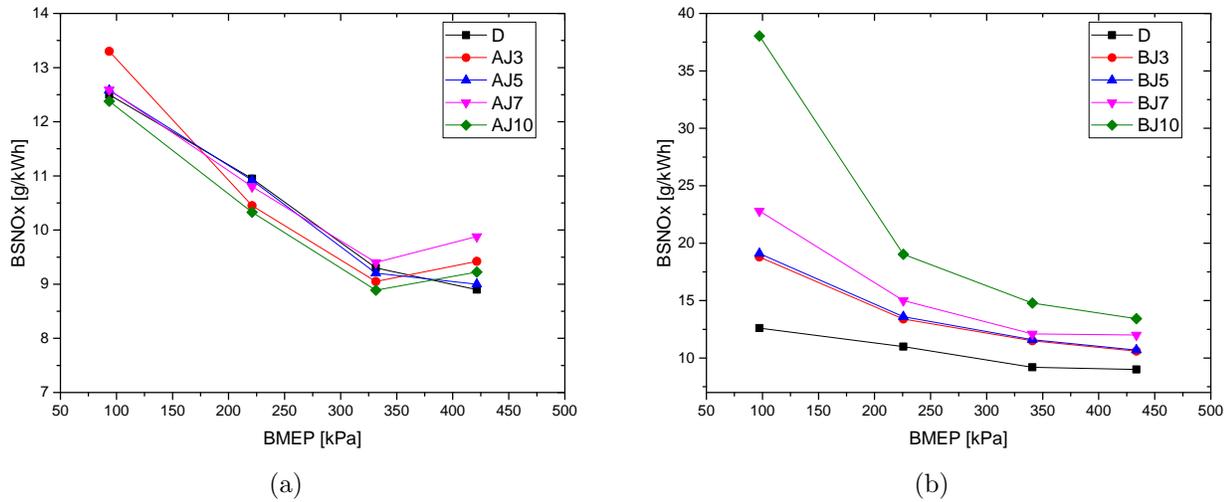


Figura 5-19.: BSNOx a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

El BSNOx obtenido con las mezclas de AJ solo son en promedio un 1.3 y 6.3 % superiores a los encontrados en el MCI operando con diésel a 2500 y 2200 rpm respectivamente. No obstante, en el régimen de giro donde se logró el mejor desempeño del motor (1900 rpm) la emisión de BSNOx conseguida con las mezclas de AJ fueron superiores a las del diésel en 35,7%. El comportamiento de la emisión específica al freno de NOx alcanzado en el MCI operando con los dos biocombustibles concuerda por lo reportado en la literatura [82, 70, 88, 120].

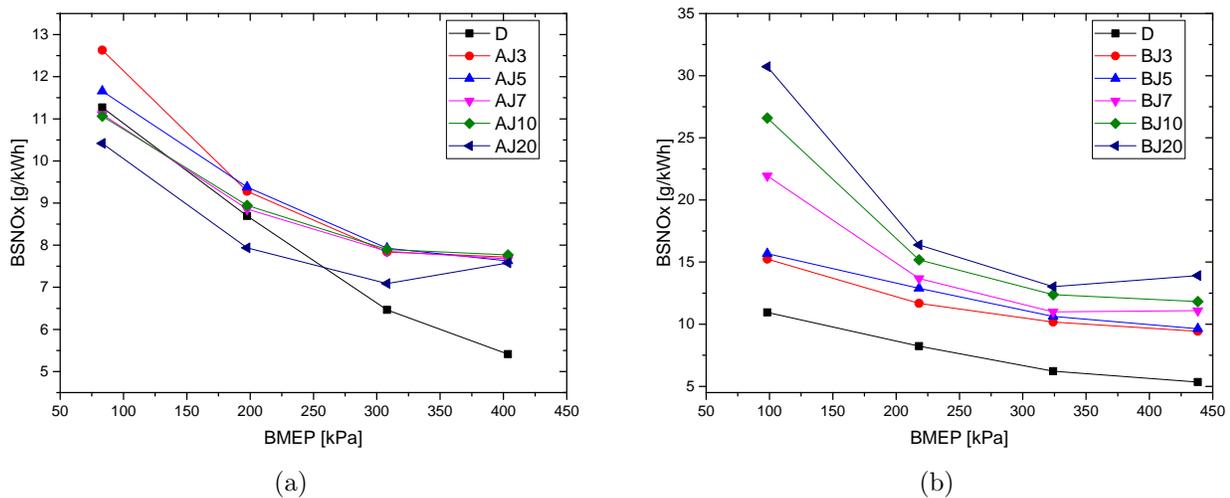


Figura 5-20.: BSNOx a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

De manera general el incremento del BSNO_x conseguido en las pruebas experimentales son causadas por el aumento en la temperatura de los gases de escape obtenidos en el MCI operando con las mezclas de los dos biocombustibles, esta condición causa que el nitrógeno presente una mayor reactividad el cual es ayudado por la mayor presencia de oxígeno, facilitando así la producción de NO_x en los procesos de combustión [108].

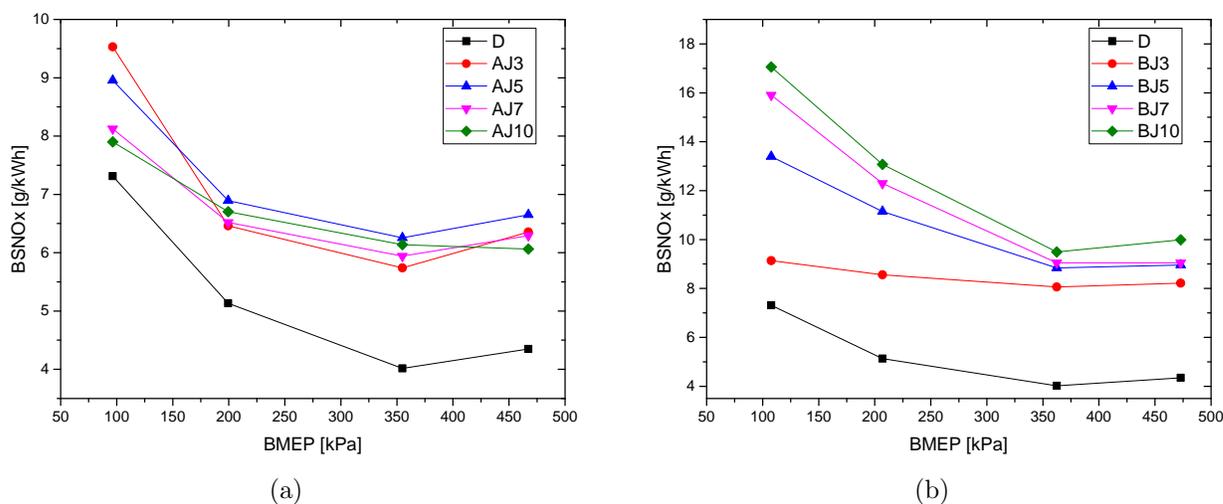


Figura 5-21.: BSNO_x a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.2.4. Emisión específica de monóxido de carbono

Los resultados obtenidos de BSCO conseguidos en el MCI-EC operando a las cuatro condiciones de carga y tres regímenes de giro se observan en las Figuras 5-22, 5-23 y 5-24 (a) y (b). En estas tres figuras se puede observar que con las mezclas de BJ existe una disminución de la emisión específica de CO en el MCI operando hasta el 75 % de carga, esta reducción es de 30.7, 31.3 y 27.2 % a 2500, 2200 y 1900 rpm respectivamente.

Con el MCI operando a 2500 rpm y hasta el 75 % de carga con las mezclas de AJ se presenta un aumento de BSCO 45.0 % para AJ3, 69.5 % para AJ5, 7.5 % para AJ7 y de 82.0 % para AJ10 y 2200 rpm y hasta el 75 % de carga el incremento de BSCO corresponde a 33.9 % para AJ3, 80.7 % para AJ5, 176.6 % para AJ7, 220.4 % para AJ10 y 183.6 para AJ20. No obstante, con el MCI operando 1900 rpm y 25 % de carga el BSCO presenta un incremento en promedio para todas las mezclas de AJ de 13.6 %, pero a 50 y 75 % de carga el BSCO disminuye en promedio para todas las mezclas de AJ en 35.2 y 44.5 %. Los resultados experimentales mostrados previamente de BSCO concuerdan con lo encontrado en la literatura internacional [11, 116, 97, 126].

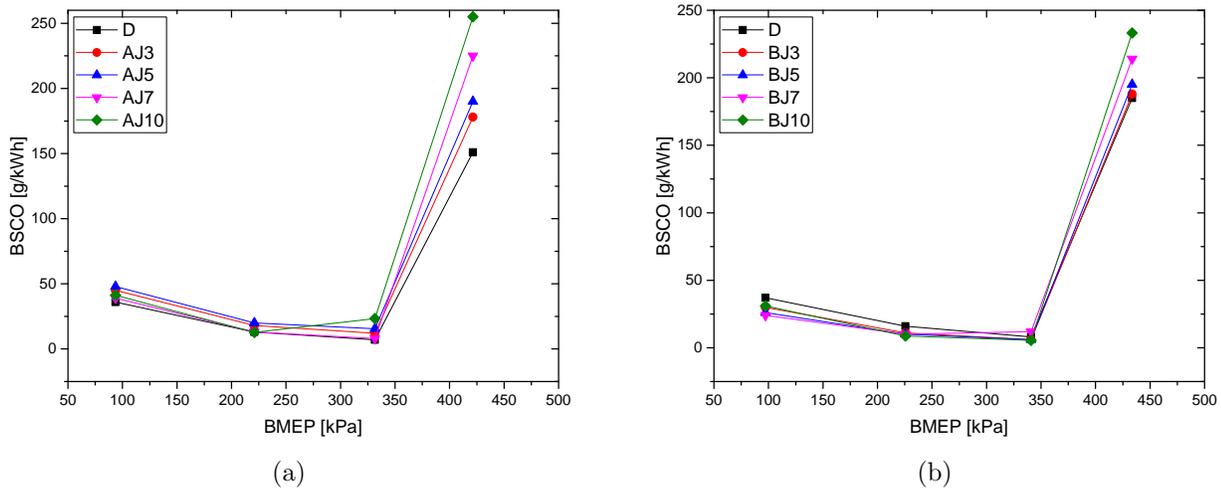


Figura 5-22.: BSCO a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en las Figuras 5-22, 5-23 y 5-24 (a) y (b) también se observa que a 100 % de carga del motor la emisión se incrementa presentando los valores máximos para las mezclas de los biocombustibles de JCL. Sin embargo, estos valores están un 100 % por encima de los reportados en la literatura [116]. Este comportamiento pudo ser causado por un mayor suministro de combustible para poder llegar a la condición de carga requerida, esto también se ve reflejado en la disminución de la relación aire combustible que se observa en el anexo D.

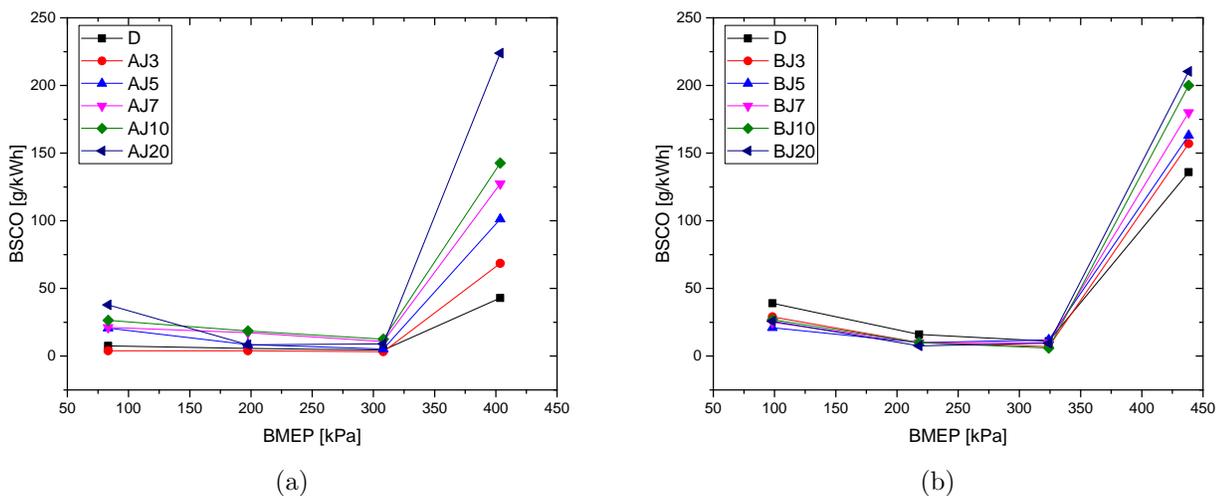


Figura 5-23.: BSCO a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

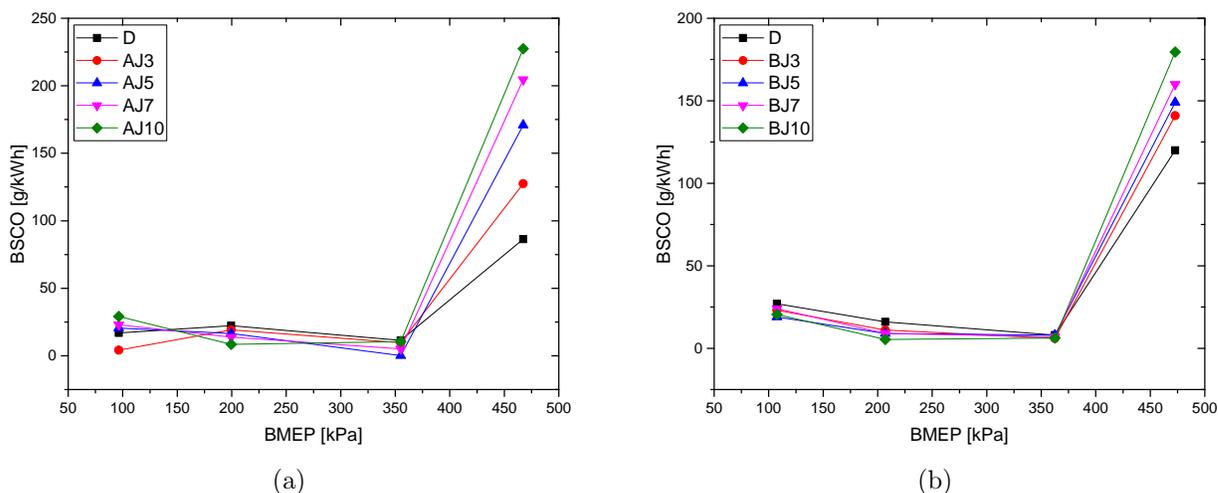


Figura 5-24.: BSCO a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.2.5. Emisión específica de material particulado

Los resultados encontrados de la emisión específica de material particulado fue obtenido solamente a 25 y 50 % de carga del MCI de los tres regímenes de giro experimentales, con el objetivo de proteger los equipos de medición ya que a 75 y 100 % se observaba una gran cantidad de material particulado emitido por el motor, causado principalmente por la mayor cantidad de combustible consumido llevando consigo un detrimento del proceso de combustión.

Las Figuras 5-25, 5-26 y 5-27 (a) y (b) presentan el comportamiento del BSPM obtenido con las mezclas de AJ y BJ, como se observa en estas Figuras el material particulado disminuye para las mezclas de los biocombustibles con la reducción de la velocidad rotacional del MCI. Por otro lado, el aumento del porcentaje de BJ en la mezcla con diésel genera una reducción del BSPM. Sin embargo, con incremento de AJ en la mezcla con diésel este parámetro se incrementa.

Los aumentos en el BSPM para las mezclas de AJ respecto a las del diésel obtenidas el MCI a 25 y 50 % de carga, en promedio fueron de 13.3 y 12.5 % para AJ3, 20.1 y 15.8 % para AJ5, 20.1 y 15.8 % para AJ7, 32.6 y 24.4 % para AJ10 y 52.6 y 34.8 % para AJ20 a 2500, 2200 y 1900 rpm, mientras que las reducciones de BSPM obtenido con las mezclas de BJ corresponden a 1 y 2.2 % para BJ3, 2.9 y 4.4 % para BJ5, 5.9 y 6.4 % para BJ7, 7.4 y 8.2 % para BJ10 y 7.3 y 9.2 % para BJ20 a 2500, 2200 y 1900 rpm.

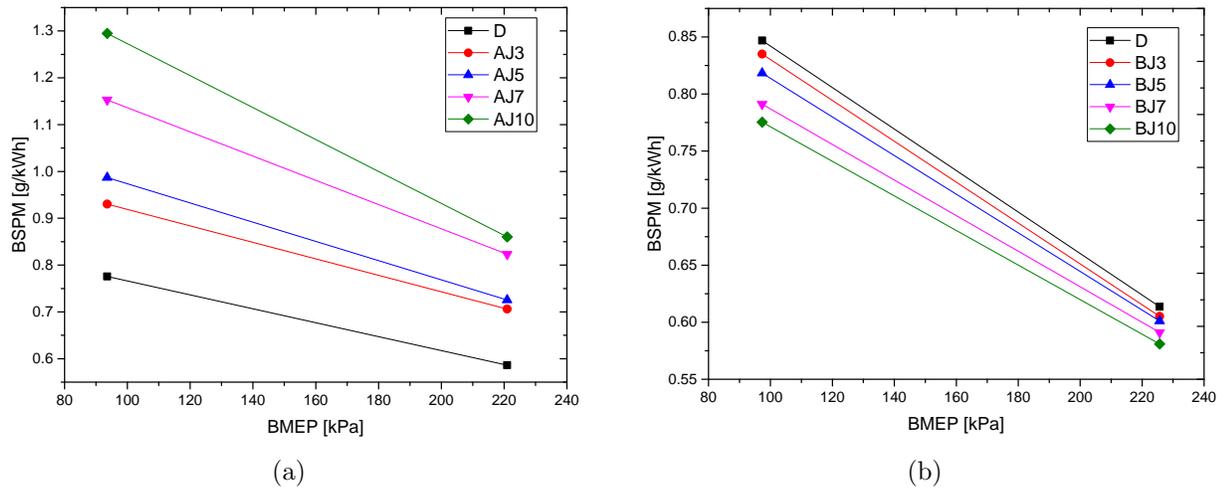


Figura 5-25.: BSPM a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

Esto tipo de comportamiento para las mezclas de BJ se debe a que se presenta un mejor proceso de combustión en el MCI con las mezclas de BJ, caso contrario se presenta con las mezclas de AJ, donde se evidencia un incremento a medida que aumenta el porcentaje de mezcla para cada BMEP. Este tipo de comportamiento es causado por los malos procesos de combustión que tienen lugar con las mezclas de AJ. Resultados similares de BSPM son encontrados en la literatura [140, 97].

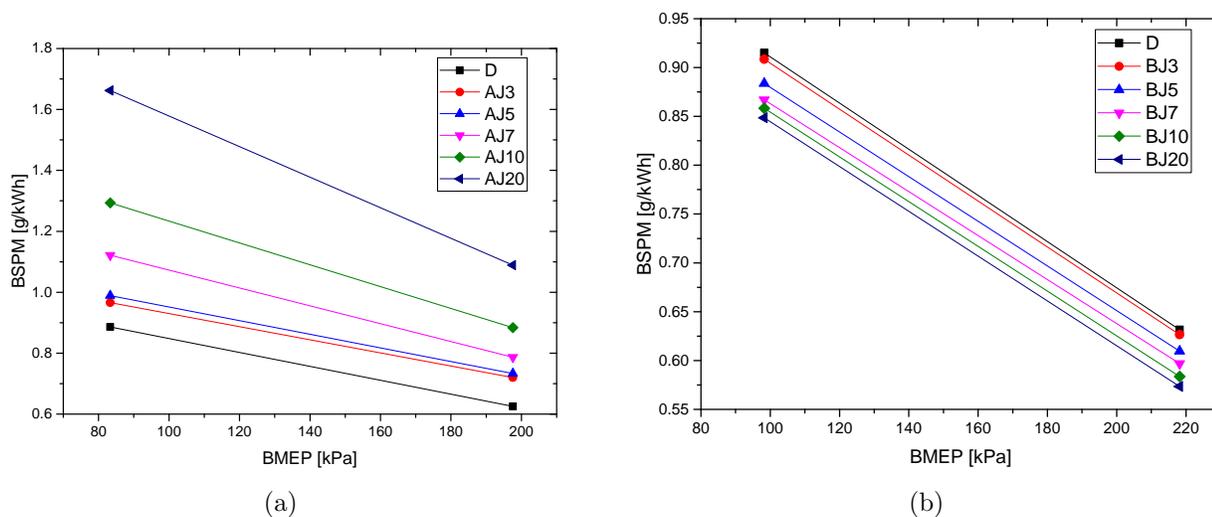


Figura 5-26.: BSPM a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

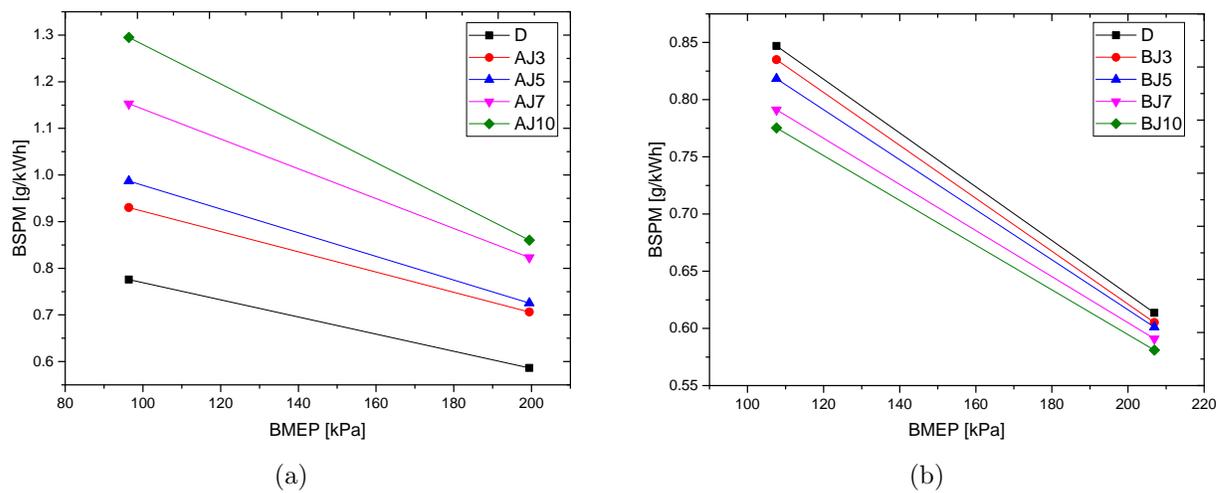


Figura 5-27.: BSPM a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b)

Fuente: Elaboración propia

5.3. Desgaste

La Figura 5-28 (a) y (b), muestra los depósitos de carbón sobre la cara superior del pistón y la culata del MCI-EC después de 60 horas de operación con las mezclas de los biocombustibles de JCL. Sin embargo, estos depósitos de carbón no difieren de los encontrados en la literatura, como se observa en las Figuras 5-29 y 5-30 (a) y (b), en las cuales se muestran los depósitos de carbón en un MCI-EC operando con diésel y con una mezcla B20 por 512 horas [10].

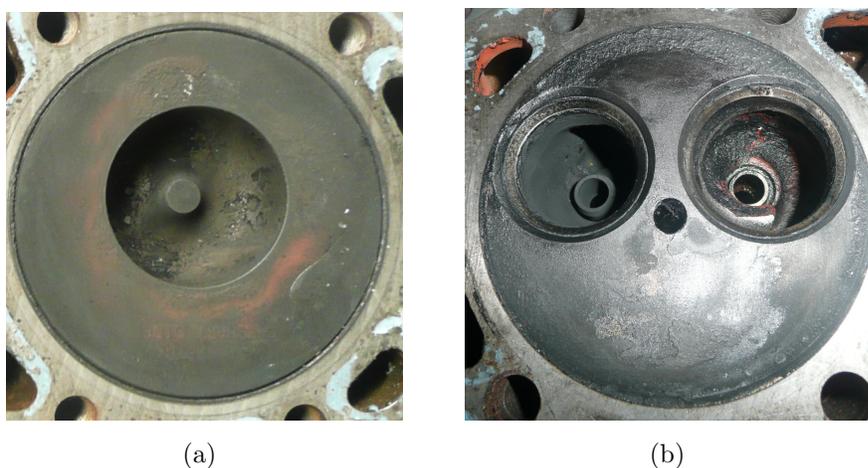
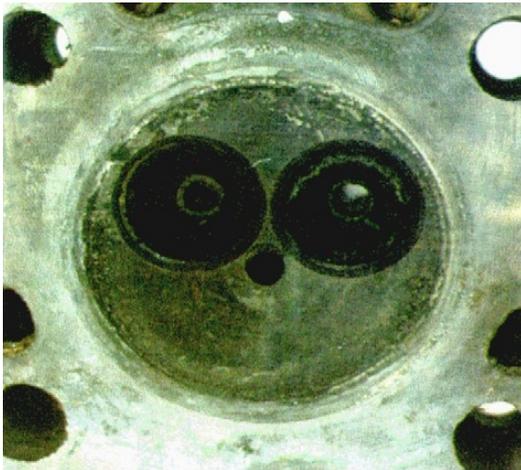


Figura 5-28.: Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b)

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en el transcurso de las pruebas experimentales no se presentó ningún tipo de taponamiento, avería en el sistema de suministro de combustible o cualquier otro sistema del MCI-EC operando con las mezclas de AJ con diésel y BJ con diésel. Por último, en la evaluación visual tampoco se observó ningún tipo de desgaste de los principales sistemas del motor. Resultados similares de desgaste y funcionamiento del motor se encontraron en la literatura internacional [71, 77].



(a)

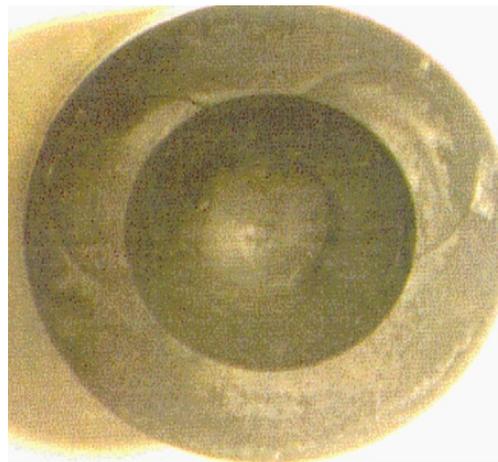


(b)

Figura 5-29.: Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b) en un MCI operando 512 horas con diésel [10]



(a)



(b)

Figura 5-30.: Depositos de carbón en la cara superior del pistón (a) y en la culata (b) en un MCI operando 512 horas con B20 [10]

5.4. Comparación de resultados con la literatura

En las Tablas 5-1 y 5-2 se comparan los resultados obtenidos en este trabajo de maestría con los encontrados en la literatura internacional, tanto para las variables de desempeño como para las de emisiones específicas al freno obtenidas en el MCI-EC operando con las mezclas de biocombustibles de JCL.

Tabla 5-1.: Comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura de los parámetros de desempeño

Comparación desempeño (variaciones respecto al diésel)				
Variable	Mezcla	Resultados literatura	Referencia	Trabajo experimental
Torque	BJ10	Reducción del 5 %	[117]	Reducción del 6 %
	BJ10	Reducción del 3 %	[87, 88]	
BSFC	BJ10	Aumento del 3 %	[117, 87, 26]	Aumento del 27 %
	BJ10	Aumento del 5 %	[26]	
	BJ10	Aumento del 8.62 %	[88, 32, 48]	
	BJ10	Aumento del 23 %	[2]	
	BJ5	Aumento del 3 %	[26]	Aumento del 13 %
	AJ10	Aumento del 5.4 %	[11]	Aumento del 33 %
	AJ5	Aumento del 8.8 %	[12]	Aumento del 16.7 %
η_{th}	BJ10	Reducción del 10.7 %	[117]	Reducción del 22 %
	BJ10	Reducción del 4.85 %	[32, 102]	
	BJ10	Reducción del 6.8 %	[48]	
	BJ5	Reducción del 7.1 %	[26]	Reducción del 8.6 %
	AJ10	Reducción del 8.8 %	[11, 12]	Reducción del 29 %

Como se observa en estas tablas las tendencias para todos los parámetros de desempeño y emisiones específicas al freno entre la literatura y este trabajo experimental coinciden. Sin embargo, existen variaciones porcentuales considerables, los cuales son causados por las diferentes condiciones experimentales (tipos de motor, altura sobre el nivel del mar y condiciones de carga) entre los trabajos.

Tabla 5-2.: Comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura de emisiones

Comparación emisiones (variaciones respecto al diésel)				
Variable	Mezcla	Literatura	Referencia	Trabajo experimental
Tem. gases	BJ10	Aumento del 5 %	[32]	Aumento del 5 %
	AJ10	Reducción del 1 %	[11]	Reducción del 1 %
	AJ10	Reducción del 11.4 %	[12]	
BSCO ₂	BJ10	Aumento del 2.79 %	[117]	Aumento del 5 %
	AJ10	Aumento del 14 %	[11]	Aumento del 18 %
	AJ10	Aumento del 7.7 %	[12]	
BSNO _x	BJ10	Aumento del 33 %	[46]	Aumento del 22 %
	BJ5	Aumento del 26 %	[46]	Aumento del 8.6 %
	AJ5	Aumento del 3.7 %	[11]	Reducción del 29 %
BSCO	AJ10	Aumento del 60 %	[11]	Aumento del 82 %
	AJ10	Aumento del 50 %	[12]	

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Con las pruebas, realizadas en el MCI operando a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá, las variables de desempeño tales como torque, BSFC y eficiencia térmica al freno no se ven fuertemente afectadas por el uso de las mezclas de BJ en proporciones iguales o inferiores al 10 % de BJ en la mezcla y con mezclas de AJ en proporciones menores al 7 % de AJ en la mezcla, esto se debe principalmente a la molécula de oxígeno presente en los bicomcombustibles de JCL la cual suple la ausencia de oxígeno presente en el ambiente y las buenas propiedades físico-químicas de los biocombustibles de JCL.

Las mezclas de BJ presentan una disminución en las emisiones de BSCO y BSPM, lo cual es un indicador de mejoras en los parámetros de combustión. No obstante, la emisión de BSNOx presenta incrementos superiores al 100 % producidos principalmente a la mayor cantidad de oxígeno disponible en el proceso de combustión y al leve aumento en la temperatura de los gases de escape el cual fue de 55 K, facilitando así la producción de NOx [135]. Sin embargo, este incremento de la emisión de NOx es contraproducente porque incrementa el ozono troposférico el cual es tóxico en seres humanos [85]. Por otro lado las emisiones con mezclas de AJ presentan un incremento del BSCO y BSMP, principalmente debido a la alta viscosidad y densidad del AJ, causando una pobre atomización del combustible conduciendo a un deficiente proceso de combustión. Sin embargo, la emisión de BSNOx no presenta variaciones en promedio superiores al 10 % respecto a las producidas por el diésel.

Con los biocombustibles de AJ y BJ se obtiene un mayor BSCO₂ con respecto al diésel en 7 y en 12.5 % en promedio, lo cual revela que existe un mejor proceso de combustión con estos biocombustibles. Este comportamiento también indica que se logra un mejor aprovechamiento de la energía disponible de las mezclas de AJ y BJ, a pesar de que estas tienen un menor LHV con respecto al diésel. Además, se observa que el LHV es la propiedad que más afecta el desempeño y las emisiones específicas obtenidas en el MCI-EC ya que estos parámetros son función de esta variable.

Del estudio se concluye que el uso de mezclas de AJ con diésel en proporciones menores al 7 % de AJ en la mezcla, son adecuadas para el uso en MCI-EC ya que las emisiones no presentan grandes incrementos y las variables de desempeño del motor diésel no sufren grandes

reducciones.

En las pruebas experimentales no se presentó ningún tipo de desgaste evidente en los elementos mecánicos del MCI durante y después de realizadas las pruebas. Por otro lado, los depósitos que se evidencian en la cara superior del pistón y en la culata del MCI, son completamente normales y no difieren mucho de los depósitos generados en cualquier MCI-EC operando con diésel tal y como se reporta en la literatura [10]. Sin embargo, 60 horas de operación del MCI con mezclas de biocombustibles de JCL no es suficiente tiempo para evaluar y obtener resultados concluyentes de desgaste y funcionamiento del motor.

6.2. Recomendaciones

- Realizar pruebas de más de 500 horas de duración en MCI-EC operando con mezclas AJ con diésel y con mezclas BJ con diésel, con el objetivo de analizar con mayor detalle el desgaste y el funcionamiento de los componentes mecánicos del MCI-EC.
- Realizar un estudio detallado de los parámetros de combustión del MCI operando con mezclas de AJ y BJ con diésel.
- Realizar un estudio de los parámetros de desempeño y emisiones de un MCI-EC operando con mezclas de AJ con diésel precalentadas.
- Realizar una validación de las emisiones de NO_x producidas en el MCI operando con mezclas de biocombustibles de JCL, debido a la incertidumbre generada en cuanto al mecanismo producción de esta emisión.
- Realizar un estudio de la distribución en masa, en número y en diámetro de material particulado en MCI-EC operando con mezclas de bicomcombustibles de JCL con diésel fósil.

Bibliografía

- [1] ABEDIN, M.J. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; SANJID, A. ; ASHRAFUL, A.M.: Combustion, performance, and emission characteristics of low heat rejection engine operating on various biodiesels and vegetable oils. En: *Energy Conversion and Management* 85 (2014), p. 173–189
- [2] ABEDIN, M.J. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; SANJID, A. ; RAHMAN, S.M.A. ; FATTAH, I.M.R.: Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine. En: *Industrial Crops and Products* 59 (2014), p. 96–104
- [3] ABHILASH, P.C. ; SRIVASTAVA, P. ; JAMIL, S. ; SINGH, N.: Revisited *Jatropha curcas* as an oil plant of multiple benefits: critical research needs and prospects for the future. En: *Environmental Science and Pollution Research* 1 (2011), p. 127–131
- [4] ACEVEDO, H.R. ; FLÓREZ, E.G.: Particle matter from a diesel engine fueled with *jatropha curcas* oil biodiesel and ultra-low sulphur diesel. En: *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro* 5 (2012), p. 83–92
- [5] ACHTEN, W.M.J. ; MAES, W.H. ; AERTS, R. ; VERCHOT, L. ; TRABUCCO, A. ; MATHIJS, E. ; SINGH, V.P. ; MUYS, B.: *Jatropha*: from global hype to local opportunity. En: *Journal of Arid Environments* 74 (2010), p. 164–165
- [6] ACHTEN, W.M.J. ; VERCHOT, L. ; FRANKEN, Y. J. ; MATHIJS, E. ; SINGH, V.P. ; AERTS, R. ; MUYS, B.: *Jatropha* bio-diesel production and use. En: *Biomass and Bioenergy* 32 (2008), p. 1063–1084
- [7] ADERIBIGBE, A.O. ; JOHNSON, C. ; MAKKAR, H.P.S. ; BECKER, K. ; FOIDL, N.: Chemical composition and effect of heat on organic matter-and nitrogen-degradability and some antinutritional components of *Jatropha* meal. En: *Animal feed science and technology* 67 (1997), p. 223–243
- [8] AGARWAL, A. K. ; GUPTA, T. ; KOTHARI, A.: Particulate emissions from biodiesel vs diesel fuelled compression ignition engine. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), p. 3278–3300

- [9] AGARWAL, A.K.: Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. En: *Progress in Energy and Combustion Science* 33 (2007), p. 233–271
- [10] AGARWAL, A.K. ; BIJWE, J. ; DAS, L.M.: Wear assessment in a biodiesel fueled compression ignition engine. En: *Journal of engineering for gas turbines and power* 125 (2003), p. 820–826
- [11] AGARWAL, A.K. ; DHAR, A.: Performance, emission and combustion characteristics of Jatropha oil blends in a direct injection CI engine / SAE Technical Paper. 2009. – Informe de Investigación
- [12] AGARWAL, D. ; AGARWAL, A.K.: Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. En: *Applied thermal engineering* 27 (2007), p. 2314–2323
- [13] AKINTAYO, E.T.: Characteristics and composition of Parkia biglobbosa and Jatropha curcas oils and cakes. En: *Bioresource technology* 92 (2004), p. 307–310
- [14] ARBOLEDA, N.: La Palma Africana en el Pacífico Colombiano: su Ilegalidad, Consecuencias y Violación de Derechos Territoriales. En: *Revista Luna Azul* 27 (2008), p. 113–126
- [15] ASHRAFUR, S.M. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; ABEDIN, M.J. ; SANJID, A.: Assessing idling effects on a compression ignition engine fueled with Jatropha and Palm biodiesel blends. En: *Renewable Energy* 68 (2014), p. 644–650
- [16] AUGUSTUS, G.D.P.S. ; JAYABALAN, M. ; SEILER, G.J.: Evaluation and bioinduction of energy components of Jatropha curcas. En: *Biomass and Bioenergy* 23 (2002), p. 161–164
- [17] AVELLANEDA, A.: Petróleo, seguridad ambiental y exploración petrolera marina en Colombia. En: *Iconos, Revista de Ciencias Sociales* 21 (2005), p. 11–17
- [18] AZAM, M.M. ; WARIS, A. ; NAHAR, N.M.: Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-traditional seed oils for use as biodiesel in India. En: *Biomass and bioenergy* 29 (2005), p. 293–302
- [19] BAJPAI, S. ; DAS, L.M.: Experimental Investigations of an IC Engine Operating with Alkyl Esters of Jatropha, Karanja and Castor Seed Oil. En: *Energy Procedia* 54 (2014), p. 701–717
- [20] BANAPURMATH, N.R. ; TEWARI, P.G. ; HOSMATH, R.S.: Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, Jatropha and sesame oil methyl esters. En: *Renewable energy* 33 (2008), p. 1982–1988

- [21] BANCO MUNDIAL, BM. *Consumo de energía procedente de combustibles fósiles*. <http://datos.bancomundial.org>. Revisado: Mayo de 2015
- [22] BELL, S. *A Beginners Guide to Uncertainty of Measurement*. http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf. Revisado: Agosto de 2015
- [23] BENJUMEA, P. ; AGUDELO, J. ; AGUDELO, A.: Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. En: *Fuel* 87 (2008), p. 2069–2075
- [24] BHUIYA, M.M.K. ; RASUL, M.G. ; KHAN, M.M.K. ; ASHWATH, N. ; AZAD, A.K.: Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel” Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2015)
- [25] BRAVO, E.: Impactos de la Explotación Petrolera en América Latina. En: *Biodiversidad* 43 (2005), p. 1–9
- [26] CHAUHAN, B. ; KUMAR, N. ; JUN, Y. D. ; LEE, K. B.: Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine. En: *Energy* 35 (2010), p. 2484–2492
- [27] CHAUHAN, B.S. ; KUMAR, N. ; CHO, H.M.: A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil and its blends. En: *Energy* 37 (2012), p. 616–622
- [28] CHITRA, P. ; VENKATACHALAM, P. ; SAMPATHRAJAN, A.: Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of Jatropha curcus oil. En: *Energy for sustainable development* 9 (2005), p. 13–18
- [29] CUI, X. ; KIM, T. ; FUJII, Y. ; KUSAKA, J. ; DAISHO, Y. ; TONGROON, M. ; CHOLLA-COOP, N.: The Effects of Jatropha-derived Biodiesel on Diesel Engine Combustion and Emission Characteristics / SAE Technical Paper. 2012. – Informe de Investigación
- [30] DHAR, A. ; AGARWAL, A.K.: Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine. En: *Fuel* 134 (2014), p. 81–89
- [31] DUNN, R.O.: Effects of minor constituents on cold flow properties and performance of biodiesel. En: *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009), p. 481–489
- [32] EDRISI, S. A. ; DUBEY, R. K. ; TRIPATHI, V. ; BAKSHI, M. ; SRIVASTAVA, P. ; JAMIL, S. ; SINGH, H.B. ; SINGH, N. ; ABHILASH, P.C.: Jatropha curcas L.: A crucified plant waiting for resurgence. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015), p. 855–862

- [33] ELANGO, T.: Combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with jatropha and diesel oil blends. En: *Thermal Science* 15 (2011), p. 1205–1214
- [34] ERRASTI, M. ; PILOTO, R. ; FERRER, N. ; E., Melo ; WERNER DE DIOS, A. ; GOYOS, L.: Caracterización de un motor diesel trabajando con mezclas de aceite de Jatropha y combustible diesel. En: *Ingeniería Energética* 34 (2013), p. 198–207
- [35] FARZIN, Y.: The impact of oil price on additions to US proven reserves. En: *Resource and Energy Economics* 23 (2001), p. 271–292
- [36] FATTAH, I.M. R. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; WAKIL, M.A. ; RASHEDUL, H.K. ; ABEDIN, M.J.: Performance and emission characteristics of a CI engine fueled with Cocos nucifera and Jatropha curcas B20 blends accompanying antioxidants. En: *Industrial Crops and Products* 57 (2014), p. 132–140
- [37] FATTAH, I.M.R. ; MASJUKI, H.H. ; LIAQUAT, A.M. ; RAMLI, R. ; KALAM, M.A. ; RIAZUDDIN, V.N.: Impact of various biodiesel fuels obtained from edible and non-edible oils on engine exhaust gas and noise emissions. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2013), p. 552–567
- [38] FAZAL, M.A. ; HASEEB, A.S.M.A. ; MASJUKI, H.H.: Biodiesel feasibility study: an evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), p. 1314–1324
- [39] FERNANDO, S. ; KARRA, P.h ; HERNANDEZ, R. ; JHA, S.K.: Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality. En: *Energy* 32 (2007), p. 884–851
- [40] FINDLATER, K.M. ; KANDLIKAR, M.: Land use and second-generation biofuel feedstocks: the unconsidered impacts of Jatropha biodiesel in Rajasthan, India. En: *Energy Policy* 39 (2011), p. 3404–3413
- [41] FLÓREZ, J.H. ; TOBÓN, D. ; CASTILO, G.A.: ¿Ha Sido Efectiva la Promoción de Soluciones Energéticas en las Zonas no Interconectadas (ZNI) en Colombia?: Un Análisis de la Estructura Institucional. En: *Cuadernos de Administración* 38 (2009), p. 219–245
- [42] FOIDL, N. ; FOIDL, G. ; SANCHEZ, M. ; MITTELBACH, M. ; HACKEL, S.: Jatropha curcas L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. En: *Bioresource Technology* 58 (1996), p. 77–82
- [43] FOIDL, N. ; FOIDL, G. ; SANCHEZ, M. ; MITTELBACH, M. ; HACKEL, S.: Jatropha curcas L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. En: *Bioresource Technology* 58 (1996), p. 77–82
- [44] FORSON, F.K. ; ODURO, E.K. ; HAMMOND-DONKOH, E.: Performance of jatropha oil blends in a diesel engine. En: *Renewable Energy* 29 (2004), p. 1135–1145

- [45] FRAER, H. ; MCCORMICK, R.L. ; CHANDLER, K. ; BUCHHOLZ, B. ; KENNETH, P.: Operating experience and teardown analysis for engines operated on biodiesel blends (B20) / SAE Technical Paper. 2006. – Informe de Investigación
- [46] GANAPATHY, T. ; GAKKHAR, R.P. ; MURUGESAN, K.: Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine. En: *Applied energy* 88 (2011), p. 4376–4386
- [47] GANGWAR, H.K. ; AGARWAL, A.K.: Emission and combustion characteristics of vegetable oil (*Jatropha curcas*) blends in an indirect ignition transportation engine / SAE Technical Paper. 2008. – Informe de Investigación
- [48] GELLER, D.P. ; ADAMS, T.T. ; GOODRUM, J.W. ; PENDERGRASS, J.: Storage stability of poultry fat and diesel fuel mixtures: specific gravity and viscosity. En: *Fuel* 87 (2008), p. 92–102
- [49] GOGOI, T.K. ; TALUKDAR, S. ; BARUAH, D.C.: Comparative analysis of performance and combustion of korocho seed oil and jatropha methyl ester blends in a diesel engine. En: *Proc. World Renewable Energy Congress*, 2011, p. 8–13
- [50] GONZALEZ, M.A. ; MORINI, M. ; PINELLI, M. ; SPINA, P.R. ; VENTURINI, M. ; FINKENRATH, M. ; POGANIETZ, W.R.: Methodology for biomass energy potential estimation: Projections of future potential in Colombia. En: *Renewable Energy* 69 (2014), p. 488–505
- [51] GOPINATH, A. ; SAIRAM, K. ; PUHAN, S. ; GANESAN, V.: Effect of FFA of *Jatropha Curcas* L Oil on Performance and Emissions of a DI Diesel Engine / SAE Technical Paper. 2012. – Informe de Investigación
- [52] GOUR, V.K.: Production practices including post harvest management of *Jatropha curcas*. En: *Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence-Focus of Jatropha, Hyderabad, India*, 2006, p. 223–251
- [53] GUAN, B. ; ZHAN, R. ; LIN, H. ; HUANG, Z.: Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines. En: *Journal of environmental management* 154 (2015), p. 225–258
- [54] GÜBITZ, G.M. ; MITTELBACH, M. ; TRABI, M.: Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. En: *Bioresource technology* 67 (1999), p. 73–82
- [55] HALDAR, S.K. ; GHOSH, B.B. ; NAG, A.: Studies on the comparison of performance and emission characteristics of a diesel engine using three degummed non-edible vegetable oils. En: *Biomass and bioenergy* 33 (2009), p. 1013–1018

- [56] HELLER, J.: *Physic nut, Jatropha curcas L.* Gatersleben : Bioersivity international, 1996
- [57] HENNING, R.: *The jatropha booklet.* Weissensberg : GTZ-ASSP Project Zambia, Choma, 2000
- [58] HEYWOOD, J. B.: *Internal combustion engine fundamentals.* New York : Mcgraw-hill, 1988
- [59] HUANG, J. ; WANG, Y. ; QIN, J. ; ROSKILLY, A.P.: Comparative study of performance and emissions of a diesel engine using Chinese pistache and jatropha biodiesel. En: *Fuel Processing Technology* 91 (2010), p. 1761–1767
- [60] HUMBURG, D.S. ; HANSEN, T.J. ; SCHUMACHER, L.G. ; MAHAPATRA, A.K. ; TAYLOR, G.L. ; ADAMS, B.T. [u. a.]: Biodiesel use and experience among state DOT agencies. En: *Applied engineering in agriculture* 22 (2006), p. 117–184
- [61] IBA, M.M. ; SHINA, M. ; CACCAVALE, R.J.: Cytochromes P4501 (CYP1): Catalytic activities and inducibility by diesel exhaust particle extract and benzo[a]pyrene in intact human lung ex vivo. En: *Toxicology* 273 (2010), p. 35–44
- [62] INDI, V.: Analysis of performance and combustion characteristics of diesel engine operating on multi-blend biodiesel. En: *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development* 3 (2014), p. 11–22
- [63] INFANTE, A. ; TOBÓN, S.: *Bioenergía para el desarrollo sostenible: políticas públicas sobre biocombustibles y su relación con la seguridad alimentaria en Colombia.* Roma : FAO, 2010
- [64] JAIN, S. ; SHARMA, M.P.: Engine performance and emission analysis using oxidatively stabilized Jatropha curcas biodiesel. En: *Fuel* 106 (2013), p. 152–156
- [65] JINDAL, S. ; NANDWANA, B.P. ; RATHORE, N.S.: Comparative evaluation of combustion, performance, and emissions of jatropha methyl ester and karanj methyl ester in a direct injection diesel engine. En: *Energy & Fuels* 24 (2010), p. 1565–1572
- [66] JINDAL, S. ; NANDWANA, B.P. ; RATHORE, N.S. ; VASHISTHA, V.: Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester. En: *Applied Thermal Engineering* 30 (2010), p. 442–448
- [67] KAUSHIK, N. ; KUMAR, K. ; KUMAR, S. ; KAUSHIK, N. ; ROY, S.: Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of Jatropha (*Jatropha curcas L.*) accessions. En: *Biomass and Bioenergy* 31 (2007), p. 497–502

- [68] KENNETH, P. ; BARNITT, R. ; HAYES, R.R. ; RATCLIFF, M. ; MCCORMICK, R.L. ; HA, L. ; FANG, H. L.: 100,000-Mile Evaluation of Transit Buses Operated on Biodiesel Blends (B20) / SAE Technical Paper. 2006. – Informe de Investigación
- [69] KOH, M.Y. ; GHAZI, T.I.M.: A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), p. 2240–2251
- [70] KRISHNA, M.V.S.M. ; RAO, V.V.R.S. ; REDDY, T.K.K. ; MURTHY, P.V.K.: Comparative studies on performance evaluation of DI diesel engine with high grade low heat rejection combustion chamber with carbureted alcohols and crude jatropha oil. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36 (2014), p. 1–19
- [71] KUMAR, M.S. ; RAMESH, A. ; NAGALINGAM, B.: An experimental comparison of methods to use methanol and *Jatropha* oil in a compression ignition engine. En: *biomass and bioenergy* 25 (2003), p. 309–318
- [72] KUMAR, N. ; CHAUHAN, S.R. ; OVARUN: Evaluation of endurance characteristics for a modified diesel engine runs on jatropha biodiesel. En: *Applied Energy* 155 (2015), p. 253–269
- [73] KUMAR, N. ; SHARMA, P.B.: *Jatropha curcas*-A sustainable source for production of biodiesel. En: *Journal of Scientific and Industrial research* 64 (2005), p. 883–889
- [74] LAPOLA, D.M. ; PRIESS, J.A. ; BONDEAU, A.: Modeling the land requirements and potential productivity of sugarcane and *jatropha* in Brazil and India using the LPJmL dynamic global vegetation model. En: *Biomass and Bioenergy* 33 (2009), p. 1087–1095
- [75] LAPOLA, D.M. ; PRIESS, J.A. ; BONDEAU, A.: Opportunities and challenges for the international trade of *Jatropha curcas*-derived biofuel from developing countries. En: *African Journal of Biotechnology* 8 (2009), p. 515–523
- [76] LIAQUAT, A.M. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; VARMAN, M. ; HAZRAT, M.A. ; SHAHABUDDIN, M. ; MOFIJUR, M.: Application of blend fuels in a diesel engine. En: *Energy Procedia* 14 (2012), p. 1124–1133
- [77] LIN, Ch. Y. ; LIN, H.A.: Diesel engine performance and emission characteristics of biodiesel produced by the peroxidation process. En: *Fuel* 85 (2006), p. 298–305
- [78] LUIJTEN, C.C.M. ; KERKHOF, E.: *Jatropha* oil and biogas in a dual fuel CI engine for rural electrification. En: *Energy Conversion and Management* 52 (2011), p. 1426–1438
- [79] MA, F. ; HANNA, M.A.: Biodiesel production: a review. En: *Bioresource technology* 70 (1999), p. 1–15

- [80] MAITY, J.P. ; BUNDSCHUH, J. ; CHENA, Ch.Y. ; BHATTACHARYA, P.: Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review. En: *Energy* 75 (2014), p. 104–113
- [81] MAKKAR, H. ; ADERIBIGBE, A. ; BECKER, K.: Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors. En: *Food chemistry* 62 (1998), p. 207–215
- [82] MAMILLA, V. R. ; MALLIKARJUN, M.V. ; RAO, G.L.N.: Effect of Combustion Chamber Design on a DI Diesel Engine Fuelled with *Jatropha Methyl Esters* Blends with Diesel. En: *Procedia Engineering* 64 (2013), p. 479–490
- [83] MANIENIYAN, V. ; SIVAPRAKASAM, S.: Investigation of diesel engine using bio-diesel (methyl ester of *Jatropha* oil) for various injection timing and injection pressure / SAE Technical Paper. 2008. – Informe de Investigación
- [84] MANTILLA, J.M.: *Modelado de la combustión de mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna.*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2010
- [85] MARTINEZ, J. ; SIDDHURAJU, P. ; FRANCIS, Gr. ; DAVILA, G. ; BECKER, K.: Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. En: *Food chemistry* 96 (2006), p. 80–89
- [86] MCKEE, D.: *Tropospheric ozone: human health and agricultural impacts.* USA : CRC Press, 1993
- [87] MILLO, Federico ; FERRARO, Carlo ; VEZZA, Davide ; VLACHOS, Theodoros: Analysis of performance and emissions of an automotive Euro 5 diesel engine fuelled with B30 from RME and JME. En: *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 4 (2011), p. 9–22
- [88] MOFIJUR, M. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; ATABANI, A.E.: Evaluation of biodiesel blending, engine performance and emissions characteristics of *Jatropha curcas* methyl ester: Malaysian perspective. En: *Energy* 55 (2013), p. 879–887
- [89] MOHAMMED, E.L.K. ; NEMIT-ALLAH, M.A.: Experimental investigations of ignition delay period and performance of a diesel engine operated with *Jatropha* oil biodiesel. En: *Alexandria Engineering Journal* 52 (2013), p. 141–149
- [90] MOHR, A. ; RAMAN, S.: Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. En: *Energy Policy* 63 (2013), p. 114–122

- [91] MONTGOMERY, D. C.: *Diseño y análisis de experimentos*. México : Limusa Wiley, 1991
- [92] MURALI, K.M. V. ; SESHAGIRI, R.V.V.R. ; MURTHY, P.V.K. ; KISHEN, K.R.: Performance evaluation of medium grade low heat rejection diesel engine with carbureted methanol and crude jatropha oil. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014), p. 122–135
- [93] MURALIDHARAN, K. ; VASUDEVAN, D.: Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. En: *Applied energy* 88 (2011), p. 3959–3968
- [94] NAHAR, K. ; OZORES-HAMPTON, M.: Jatropha: An Alternative Substitute to Fossil Fuel. En: *Horticultural Sciences* (2014)
- [95] NAHAR, K. ; SUNNY, S.A.: Extraction of biodiesel from a second generation energy crop (*Jatropha curcas* L.) by transesterification process. En: *Journal of Environmental Science and Technology* 4 (2011), p. 498–503
- [96] NAIK, S.N. ; GOUD, V.V. ; P.K., Rout ; DALAI, A.K.: Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), p. 578–597
- [97] NGUYEN, K.B. ; DAN, T. ; ASANO, I.: Combustion, performance and emission characteristics of direct injection diesel engine fueled by *Jatropha* hydrogen peroxide emulsion. En: *Energy* 74 (2014), p. 301–308
- [98] NO, S.Y.: Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: a review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), p. 131–149
- [99] OIL, Pakistan S. *PSOs Biodiesel Initiative for the promotion of Biodiesel in Pakistan*. http://www.psopk.com/products_services/pdf/bio_diesel.pdf. Revisado: Junio de 2015
- [100] ÖNER, C. ; ALTUN, Ş.: Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. En: *Applied Energy* 86 (2009), p. 2114–2120
- [101] ONG, H.C. ; MAHLIA, T.M.I. ; MASJUKI, H.H. ; NORHASYIMA, R.S.: Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: a review. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), p. 3501–3515
- [102] ONG, H.C. ; MASJUKI, H.H. ; MAHLIA, T.M.I. ; SILITONGA, A.S. ; CHONG, W.T. ; YUSAF, T.: Engine performance and emissions using *Jatropha curcas*, *Ceiba pentandra*

- and Calophyllum inophyllum biodiesel in a CI diesel engine. En: *Energy* 69 (2014), p. 427–445
- [103] OPENSHAW, K.: A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. En: *Biomass and Bioenergy* 19 (2000), p. 1–15
- [104] PALACIO, C.: PIÑON (*Jatropha curcas* L.) / Colombiana de biocombustibles. 2012. – Informe de Investigación
- [105] PALASH, S.M. ; KALAM, M.A. ; MASJUKI, H.H. ; ARBAB, M.I. ; MASUM, B.M. ; SANJID, A.: Impacts of NOx reducing antioxidant additive on performance and emissions of a multi-cylinder diesel engine fueled with *Jatropha* biodiesel blends. En: *Energy Conversion and Management* 77 (2014), p. 577–585
- [106] PANDEY, V. C. ; SINGH, K. ; SINGH, J. S. ; KUMAR, A. ; SINGH, B. ; SINGH, R. P.: *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), p. 2870–2883
- [107] PAUL, G. ; DATTA, A. ; MANDAL, B.K.: An Experimental and Numerical Investigation of the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with *Jatropha* Biodiesel. En: *Energy Procedia* 54 (2014), p. 455–467
- [108] PAYRI, F. ; DESANTES, J.M. ; OTROS: *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona : Reverté, 2011
- [109] PEDRAZA, E. A. ; G., Cayón D.: Caracterización morfofisiológica de *Jatropha curcas* L. variedad Brasil cultivada en dos zonas de Colombia. En: *Acta Agronómica* 59 (2010), p. 30–36
- [110] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. *Plan Indicativo De Expansión De Cobertura De Energía Eléctrica 2010-2014*. <http://www.upme.gov.co>. Revisado: Julio de 2015
- [111] POURKHESALIAN, A. ; SHAMEKHI, A. ; SALIMI, F.: Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics. En: *Fuel* 89 (2010), p. 1056–1063
- [112] PRADEEP, V. ; SHARMA, R.P.: Use of HOT EGR for NOx control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from *Jatropha* oil. En: *Renewable Energy* 32 (2007), p. 1136–1154
- [113] PRADHAN, P.a ; RAHEMAN, H. ; PADHEE, D.: Combustion and performance of a diesel engine with preheated *Jatropha curcas* oil using waste heat from exhaust gas. En: *Fuel* 115 (2014), p. 527–533

- [114] PRASAD, L. ; PRADHAN, S. ; DAS, L.M. ; NAIK, S.N.: Experimental assessment of toxic phorbol ester in oil, biodiesel and seed cake of *Jatropha curcas* and use of biodiesel in diesel engine. En: *Applied Energy* 93 (2012), p. 245–250
- [115] PULKRABEK, W. W.: *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. New Jersey : Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1997
- [116] RAHEMAN, H. ; KUMARI, S.: Combustion characteristics and emissions of a compression ignition engine using emulsified *jatropha* biodiesel blend. En: *Biosystems engineering* 123 (2014), p. 29–39
- [117] RAHMAN, M.M. ; HASSAN, M.H. ; KALAM, M.A. ; ATABANI, A.E. ; MEMON, L.A. ; RAHMAN, S.A.: Performance and emission analysis of *Jatropha curcas* and *Moringa oleifera* methyl ester fuel blends in a multi-cylinder diesel engine. En: *Journal of Cleaner Production* 65 (2014), p. 304–310
- [118] RAHMAN, S.M.A. ; MASJUKI, H.H. ; KALAM, M.A. ; ABEDIN, M.J. ; SANJID, A. ; IMTENAN, S.: Effect of idling on fuel consumption and emissions of a diesel engine fueled by *Jatropha* biodiesel blends. En: *Journal of Cleaner Production* 69 (2014), p. 208–215
- [119] RAINA, A. K. ; GAIKWAD, B. R.: Chemobotany of *Jatropha* species in India and further characterisation of *curcas* oil. En: *Journal of the Oil Technologists' Association of India* 19 (1987), p. 81–85
- [120] REY, S. ; KONDO, C. ; YAMANE, K. ; KAWASAKI, K.: Potential of a Dual Fuel DI Diesel Engine Fuelled with *Jatropha Curcas* L. Oil and Producing Gas Derived from Biomass / SAE Technical Paper. 2012. – Informe de Investigación
- [121] ROJAS, N.Y.: Revisión de las emisiones de material particulado por la cumbustión de diesel y biodiesel. En: *Revista de Ingeniería* 20 (2004), p. 58–68
- [122] ROMERO, H. ; CALDERÓN, L.: Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia / Fedesarrollo. 2012. – Informe de Investigación. – 146 p.
- [123] ROWANGOULD, G. M.: A new approach for evaluating regional exposure to particulate matter emissions from motor vehicles. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 34 (2015), p. 307–317
- [124] ROWANGOULD, G.M.: A new approach for evaluating regional exposure to particulate matter emissions from motor vehicles. En: *Transportation Research Part D* 34 (2015), p. 307–317

- [125] SHAH, A. and Gupta M.: Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by combination of ultrasonication and aqueous enzymatic oil extraction. En: *Bioresource technology* 96 (2005), p. 121–123
- [126] SHARMA, A. ; MURUGAN, S.: Investigation on the behaviour of a DI diesel engine fueled with *Jatropha Methyl Ester* (JME) and Tyre Pyrolysis Oil (TPO) blends. En: *Fuel* 108 (2013), p. 699–708
- [127] SIERRA, M. ; QUIÑONES, L. ; RODRÍGUEZ, M.: Uso potencial de las mezclas de biodiesel de *Jatropha* y de palma en Colombia. En: *Studiositas* 5 (2010), p. 75–87
- [128] SORATE, K. A. ; BHALE, P.V.: Biodiesel properties and automotive system compatibility issues. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015), p. 777–798
- [129] STONE, R.: *Introduction to internal combustion engines*. London : Palgrave Macmillan, 2002
- [130] TAN, P. ; HU, Z. ; LOU, D. ; LI, B.: Particle number and size distribution from a diesel engine with *jatropha* biodiesel fuel / SAE Technical Paper. 2009. – Informe de Investigación
- [131] TAN, P. ; HU, Z. ; LOU, D. ; LI, Z.: IExhaust emissions from a light-duty diesel engine with *Jatropha* biodiesel fuel. En: *Energy* 39 (2012), p. 356–362
- [132] TAO, Y.: Operation of a cummins N14 diesel on biodiesel: performance, emissions and durability. National Biodiesel Board / Ortech Report. 1995. – Informe de Investigación
- [133] TEWARI, D. N.: *Jatropha & bio-diesel*. New Delhi : Ocean Books, 2007
- [134] TIWARI, A.K. ; KUMAR, A. ; RAHEMAN, H.: Biodiesel production from *jatropha* oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process. En: *Biomass and bioenergy* 31 (2007), p. 569–575
- [135] TURNS, S.R.: *An introduction to combustion*. USA : McGraw-hill New York, 1996
- [136] ULRICH, K.T. ; EPPINGER, S.D.: *Diseño y desarrollo de productos*. México : McGraw-Hill Interamerican, 2013
- [137] VARATHARAJAN, K. ; CHERALATHAN, M. ; VELRAJ, R.: Mitigation of NO_x emissions from a *jatropha* biodiesel fuelled DI diesel engine using antioxidant additives. En: *Fuel* 90 (2011), p. 2721–2725
- [138] DE VRIES, S. ; VAN DE VEN, G. ; VAN ITTERSUM, M.K.: First or second generation biofuel crops in Brandenburg, Germany? A model-based comparison of their production-ecological sustainability. En: *European Journal of Agronomy* 52 (2014), p. 166–179

-
- [139] WALPOLE, R.E. ; MYERS, R.H. ; MYERS, S.L.: *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México : Pearson Educación, 1999
- [140] WESTPHAL, G. ; KRAHL, J. ; MUNACK, A. ; ROSENKRANZ, N. ; SCHROÏ^DER, O. ; SCHAAK, J. ; PABST, Ch. ; BRUÏ^NING, T. ; BUÏ^NGER, J.: Combustion of hydrotreated vegetable oil and jatropha methyl ester in a heavy duty engine: emissions and bacterial mutagenicity. En: *Environmental science & technology* 47 (2013), p. 6038–6046
- [141] INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS, IPSE. *Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas de Colombia*. <http://www.minminas.gov.co>. Revisado: Enero de 2014

A. Anexo: Curva de calibración del LFE

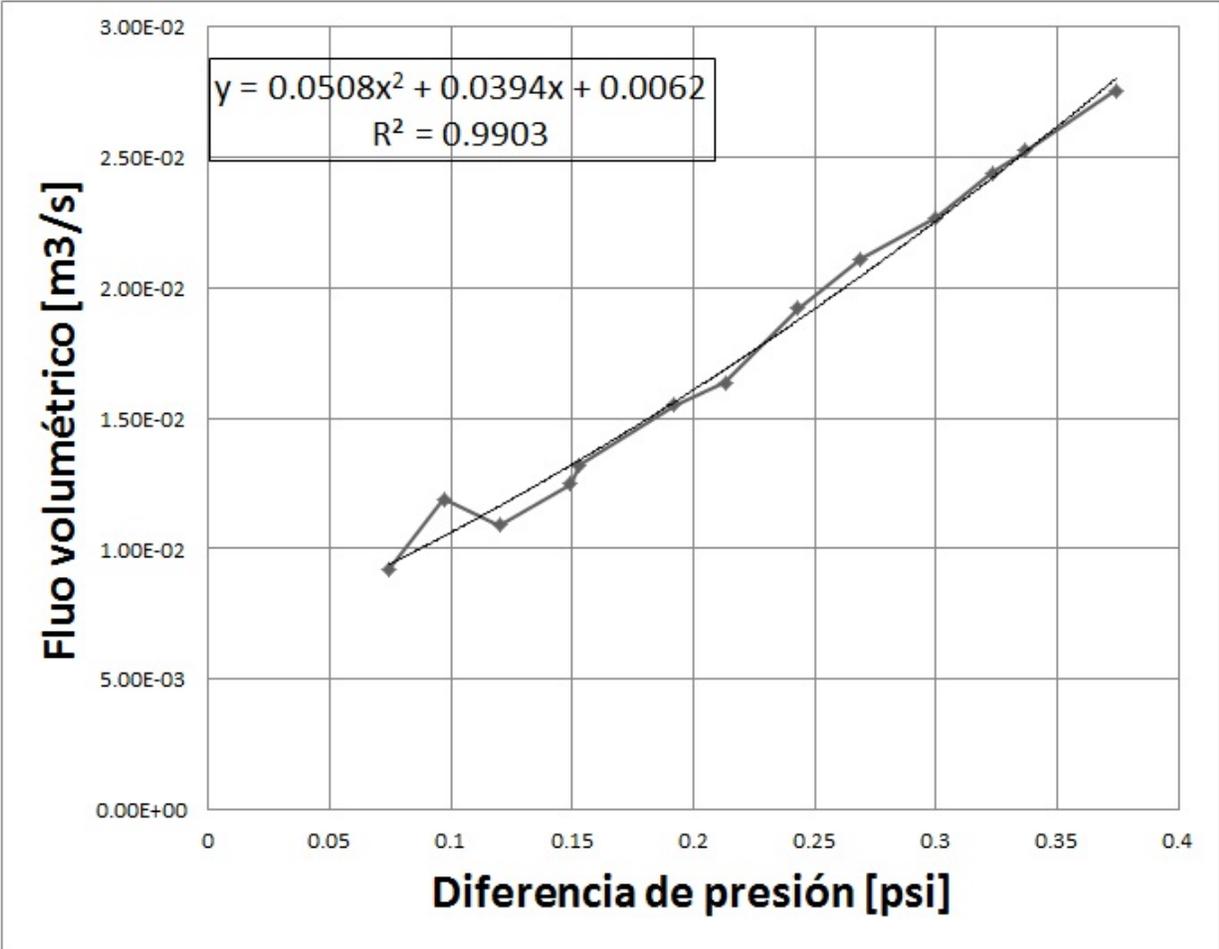


Figura A-1.: Curva de calibración flujo volumétrico aire seco en función de la diferencia de presión

Fuente: Elaboración propia

B. Anexo: Curva característica del MCI de prueba

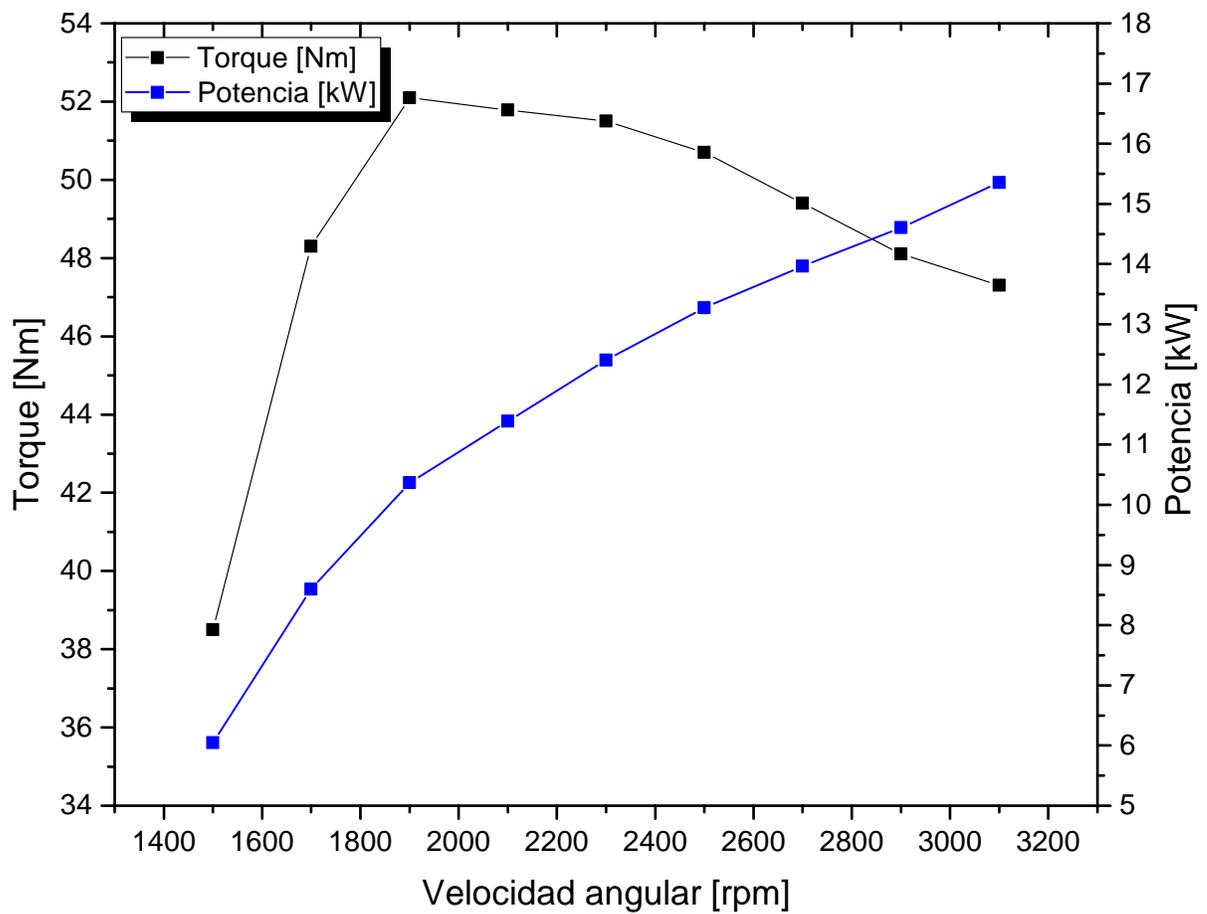


Figura B-1.: Resultados de torque y potencia de las pruebas de puesta a punto y calibración del MCI

Fuente: Elaboración propia

C. Anexo: Valores de las condiciones atmosféricas obtenidos en las pruebas experimentales.

Tabla C-1.: Valores de las condiciones atmosféricas obtenidos en las pruebas experimentales.

Variable	Unidad	Experimentos						
		1	2	3	4	5	6	7
Presión atmosférica	kPa	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2
Temperatura ambiente	K	294.15	293.15	292.65	294.15	293.25	294.45	293.55
Humedad relativa	%	70	68	72	72	71	73	71

Fuente: Elaboración propia

D. Anexo: Resultados de la relación aire-combustible (AF)

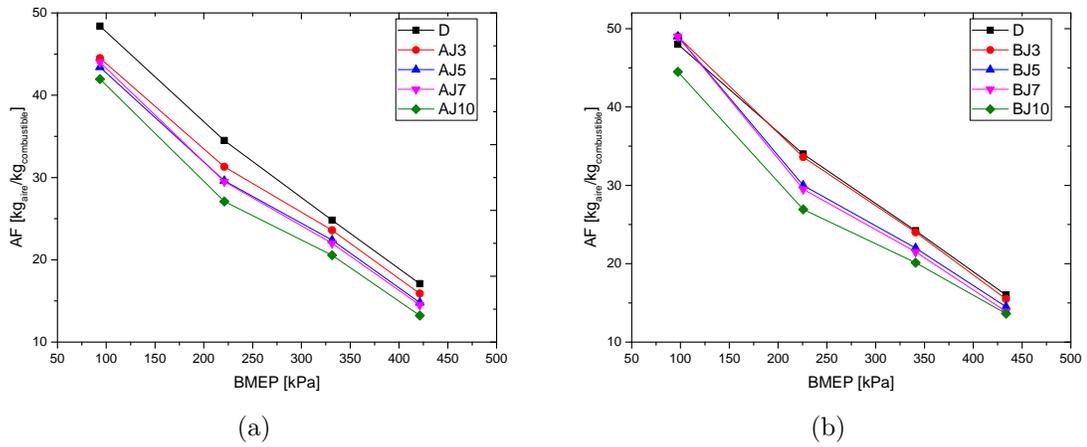


Figura D-1.: AF a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

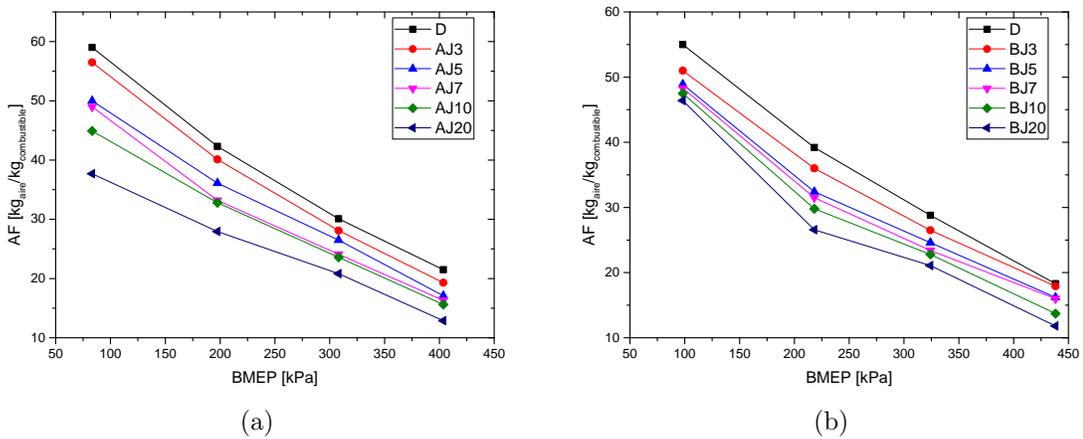


Figura D-2.: AF a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

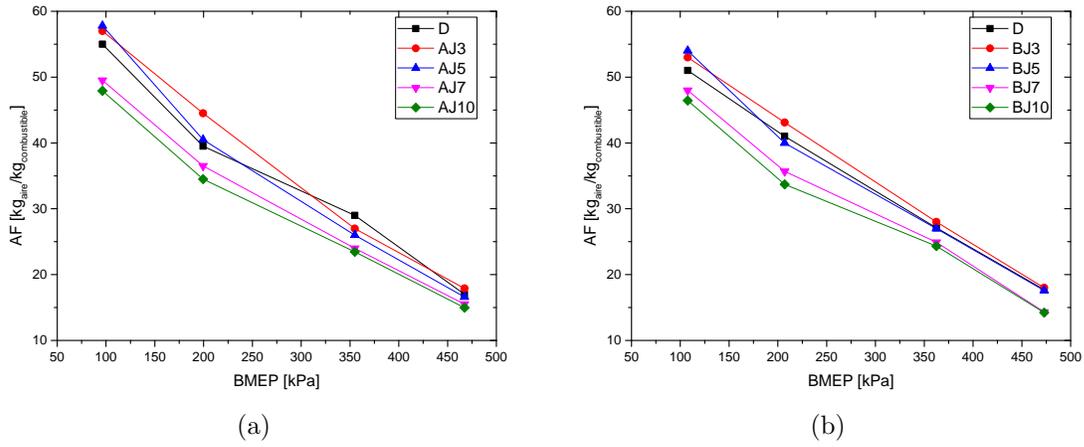


Figura D-3.: AF a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

E. Anexo: Resultados de emisión específica al freno de hidrocarburos sin quemar

Las Figuras E-1, E-2 y E-3 muestran el BSHC del MCI operando a los tres regímenes de giro y las cuatro condiciones de carga, como se observa el BSHC es mayor en todas las velocidades y condiciones de carga para las mezclas de AJ con diésel y aumenta también con el porcentaje de AJ en la mezcla, este comportamiento se debe principalmente a los malos procesos de combustión que se presentan en el motor, el cual es causado por la alta viscosidad del aceite, la cual genera malos procesos de inyección lo que permite que se tengan mezclas estratificadas en la cámara de combustión.

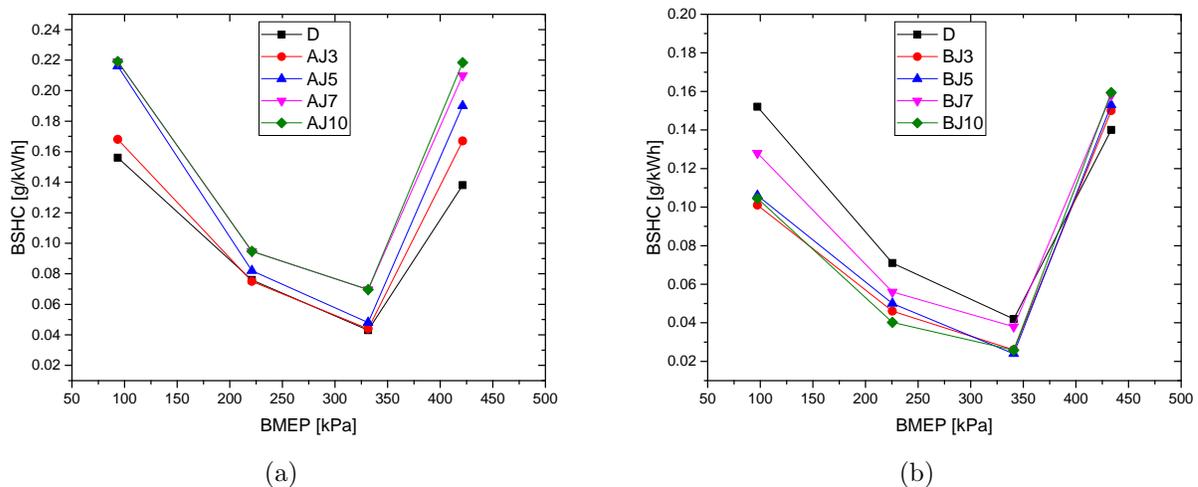


Figura E-1.: BSHC a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado con las mezclas de BJ con diésel se obtiene un reducción para todos los regímenes de giro y todas las condiciones de carga, además se tiene una disminución con el aumento del porcentaje de mezcla con diésel, Esto se debe a los buenos procesos de combustión que se tienen con las mezcla de biodiesel con diésel, lo cual genera que se quemen casi por completo las moléculas de hidrocarburos. Es interesante observar que las emisiones más bajas

de BSHC se presentan al 50 y 75 % de carga y las emisiones más altas se presentan al 25 y 100 % de carga, esto es lógico ya que al 100 % de carga se obtienen una gran potencia pero unas emisiones muy altas y al 25 % se tiene baja potencia y unas emisiones bajas pero relativamente altas en comparación con las cargas del 50 y 75 %.

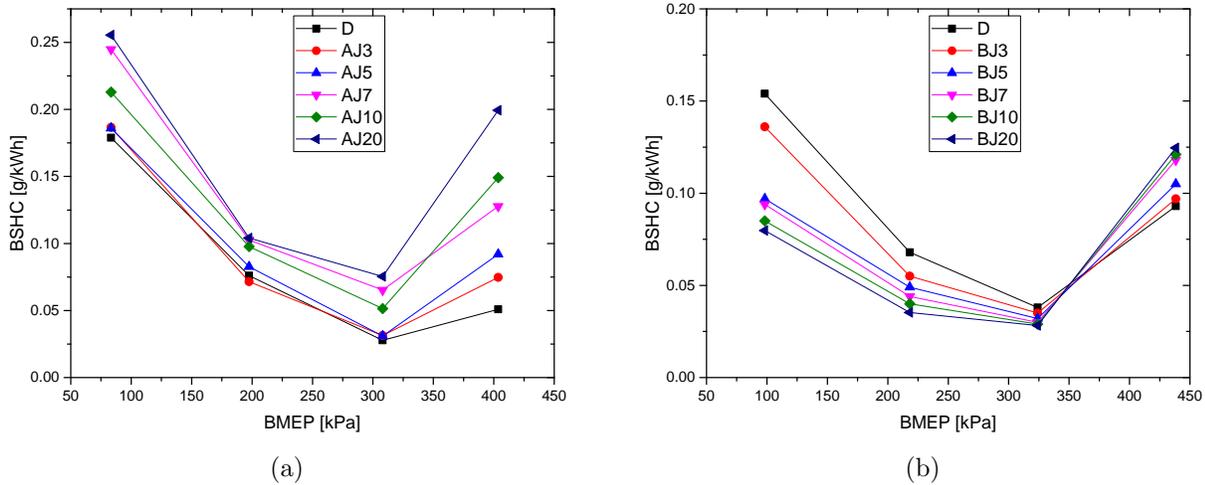


Figura E-2.: BSHC a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

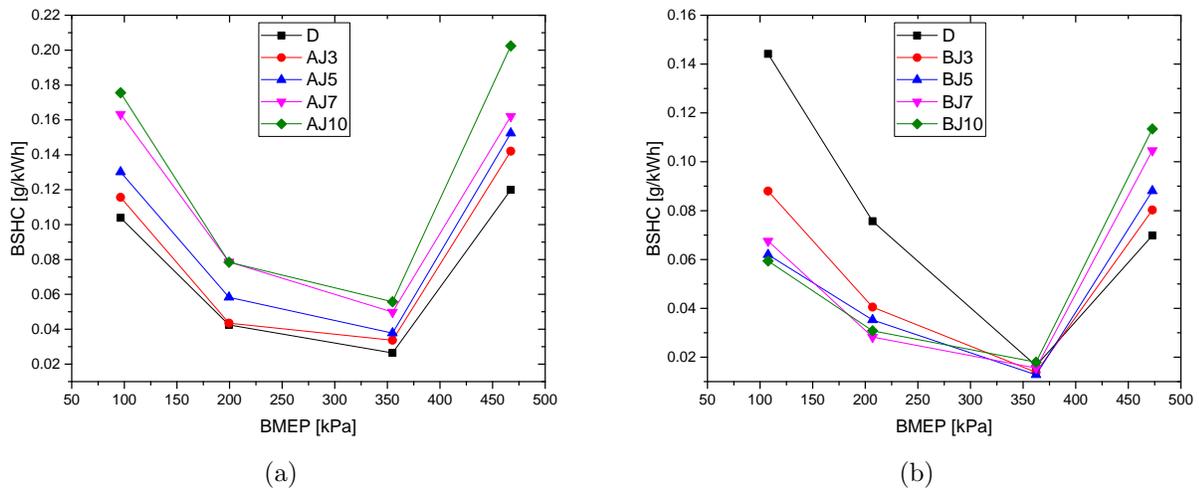


Figura E-3.: BSHC a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

F. Anexo: Resultados de oxígeno

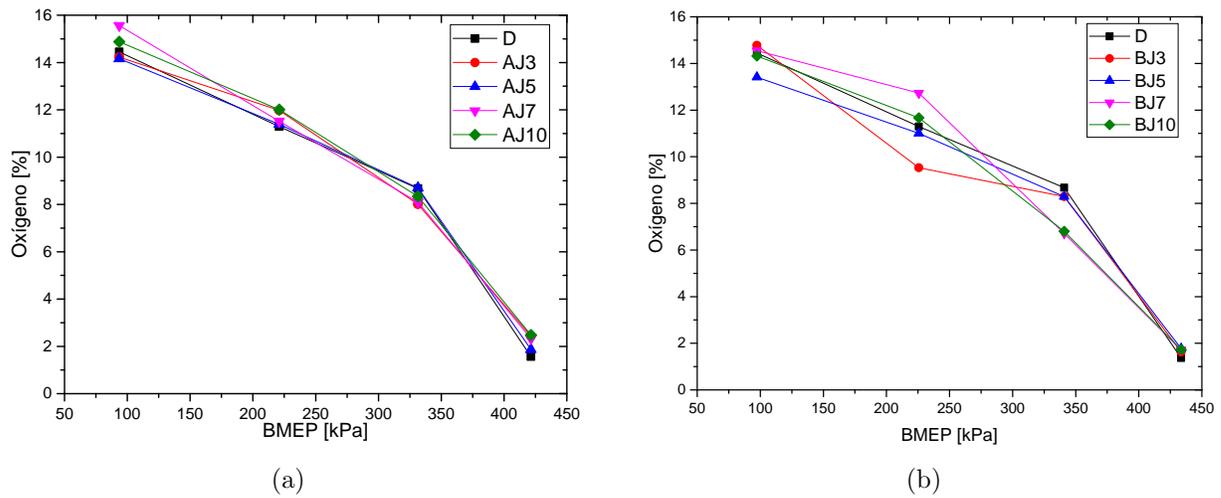


Figura F-1.: Oxígeno a 2500 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

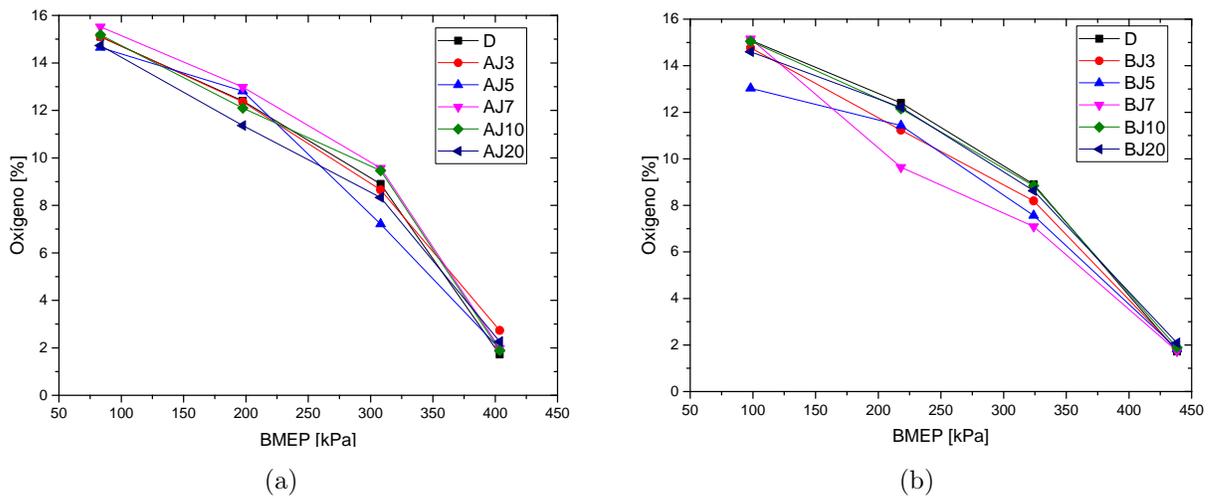


Figura F-2.: Oxígeno a 2200 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

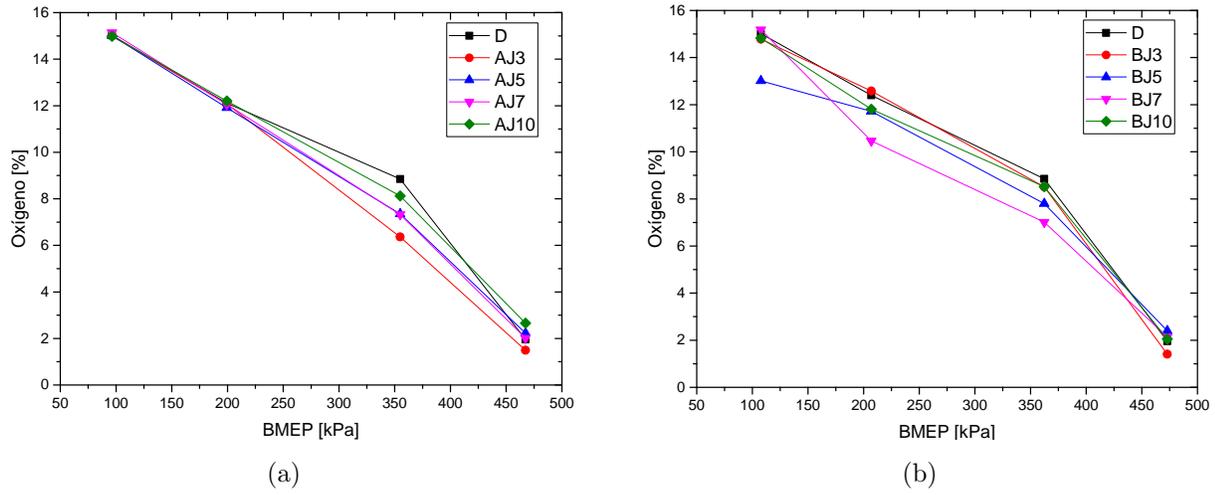


Figura F-3.: Oxígeno a 1900 rpm para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de diésel con BJ (b).

Fuente: Elaboración propia

G. Anexo: Resultados de distribución de material particulado

Las Figuras G-1, G-2, G-3 G-4 G-5 G-6 (a) y (b) muestran los resultados obtenidos de distribución de material particulado del MCI operando a los tres regímenes de giro experimentales a 50 y 25 % de carga.

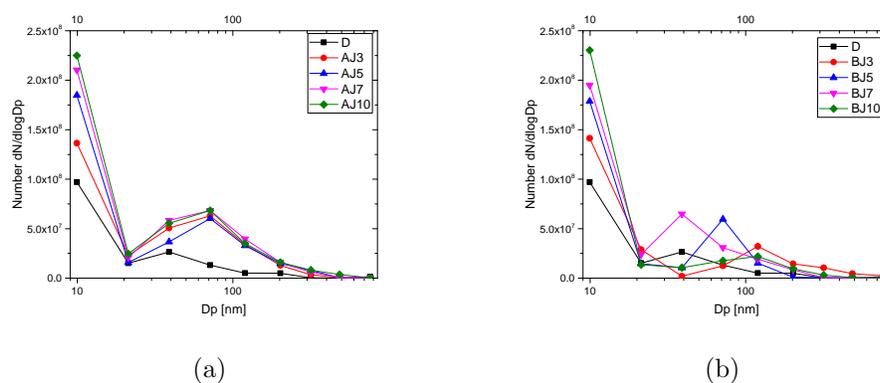


Figura G-1.: Distribución de MP en número a 2500 rpm y 50 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).
Fuente: Elaboración propia

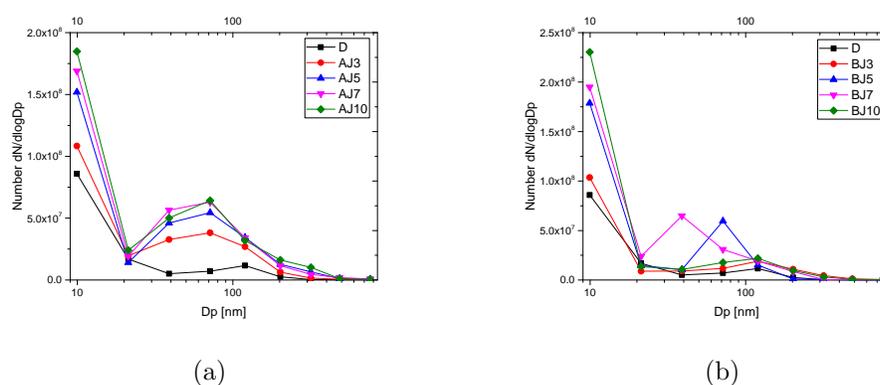


Figura G-2.: Distribución de MP en número a 2500 rpm y 25 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).
Fuente: Elaboración propia

Estas Figuras se observa que con las mezclas de AJ se presentan una gran cantidad de partículas de tamaño 10nm, pero también se tiene una distribución considerable en el rango entre los 30 y 110 nm respecto del diésel y aumenta con el porcentaje de mezcla de AJ en el diésel. Sin embargo, con las mezclas de BJ presentan una gran cantidad de partículas de tamaño 10 nm pero no se observa alguna tendencia para ninguna mezcla en el resto de diámetros. La principal diferencia entre las mezclas de AJ y BJ con diésel es que las mezclas de BJ no presenta una distribución de partículas en el rango de 30 a 110 nm.

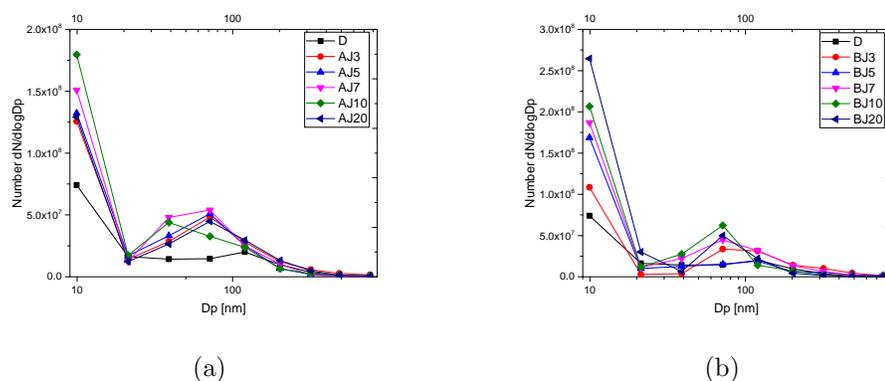


Figura G-3.: Distribución de MP en número a 2200 rpm y 50% de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

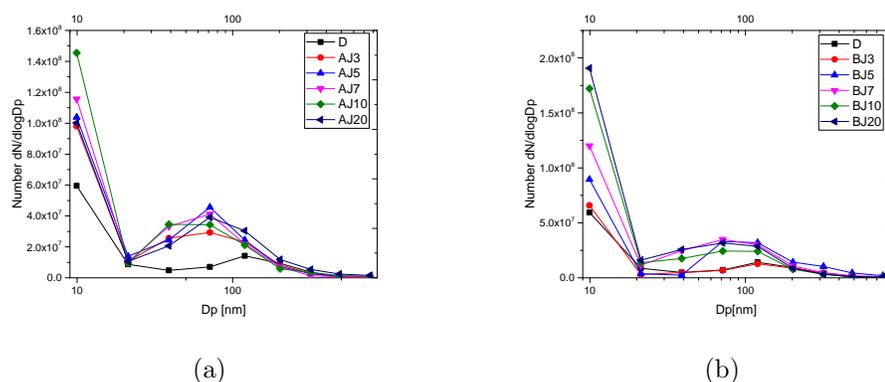


Figura G-4.: Distribución de MP en número a 2200 rpm y 25% de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

Este tipo de comportamiento en la distribución de partículas, puede ser causado por el oxígeno adicional en el proceso de combustión, Por otro lado, el domo de partículas que se observa para las mezclas de AJ con diésel se deben principalmente a los deficientes procesos

de combustión que se llevan a cabo por la mala atomización de combustible generando partículas de diámetro más grande.

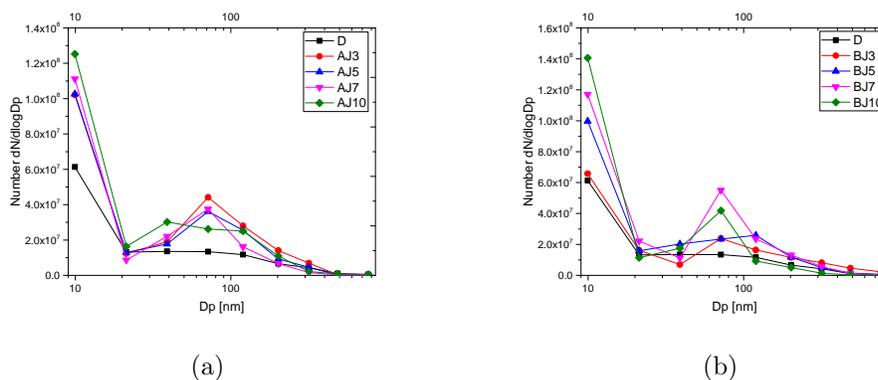


Figura G-5.: Distribución de MP en número a 1900 rpm y 50 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

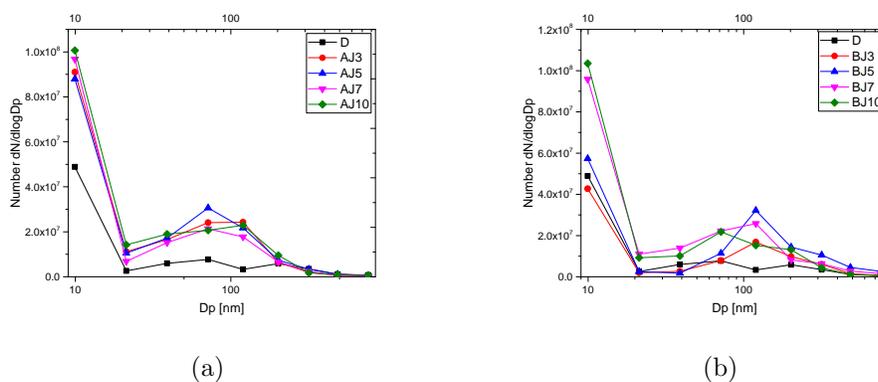


Figura G-6.: Distribución de MP en número a 1900 rpm y 25 % de carga para mezclas de diésel con AJ (a) y mezclas de BJ con diésel (b).

Fuente: Elaboración propia

Declaración

Me permito afirmar que he realizado la presente tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en la propia tesis. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá, D.C., 18.11.2015

Alexander García Mariaca