

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN CON MEZCLAS DE BIODIÉSEL CON
DIÉSEL**

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de
Biosistemas como requisito para optar por el grado de:
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Eduard Cordero Navarro

Director:

Dr. Pedro Casanova Treto

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica
2020

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Bach. Eduard Cordero Navarro.

Estudiante



Dr. Pedro Casanova Treto.

Director, Trabajo Final de Graduación



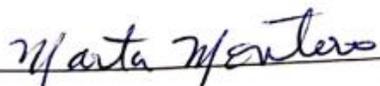
Dra. Kattia Solís Ramírez.

Miembro, Equipo Asesor



Lic. Leonardo Salazar Salazar.

Miembro, Equipo Asesor



Dra. Marta Montero Calderón.

Miembro, Tribunal Examinador



Lic. Oscar Quesada Chacón.

Miembro, Tribunal Examinador

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme finalizar esta etapa de mi vida.

A mi madre por todo el esfuerzo y apoyo que me dio en todos estos años.

A mi familia por todo el apoyo.

Al proyecto de investigación 731-B6-287 “Producción de biodiesel, análisis de su potencial como biocombustible y su desempeño en motores de combustión interna”.

A los profesores Pedro y Kattia por confiar en mí y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, por cada una de las observaciones que me permitieron generar un trabajo de calidad.

A Leonardo Salazar por la oportunidad de trabajar con él, compartir sus conocimientos, por la paciencia y consejos para desarrollar este trabajo. Le agradezco por todos sus consejos, tanto profesionales como de vida que me enseñó en el tiempo en el que estuve realizando los ensayos. Por inculcar en mí el pensamiento: “De devolverle a la sociedad lo que la sociedad me ha dado a mí”.

Al personal de RECOPE, por permitir realizar mi trabajo final de graduación con ellos, por todo el apoyo y facilidades que me brindaron en su empresa.

DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo que me han brindado en este tiempo, especialmente a mi madre por el apoyo incondicional durante todo este tiempo de formación académica.

A mis abuelos Miriam y Gerardo por siempre escucharme y motivarme.

A mi tía Laura, Moisés, Julián y Luis por estar siempre ahí y a mi Padrino Alex el cual ha sido un padre para mí.

A Ismael y Valentina, mi principal motor para seguir adelante y nunca rendirme.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	V
Índice de Cuadros	VIII
Índice de Figuras	X
Lista de Abreviaturas	XII
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Generalidades del motor diésel	6
1.2 Medición del rendimiento del motor	7
1.3 Características importantes del motor	8
1.3.1 Relación de compresión	8
1.3.2 Potencia indicada	9
1.3.3 Presión media efectiva	10
1.3.4 Torque al freno	10
1.3.5 Potencial al freno	11
1.3.6 Potencia de fricción	11
1.3.7 Potencia del combustible	12
1.3.8 Consumo específico de combustible (BSFC)	12
1.3.9 Eficiencia global	13
1.3.10 Eficiencia térmica	13
1.3.11 Presión de combustible (presión de inyección):	13

1.3.12 Tiempo de inyección	14
1.3.13 Temperatura de refrigerante	14
1.3.14 Temperatura de los gases de escape	14
1.3.15 Flujo a través de los cilindros (Blowby)	14
1.3.16 Inyección de riel común	14
1.3.17 Inyección directa de combustible	15
1.3.18 Motor de aspiración natural	15
1.3.19 Turbo	15
1.3.20 Interenfriador	15
1.3.21 Ralentí	16
1.3.22 OBD II	16
1.3.23 Map Sensor	16
1.3.24 Orden de encendido del motor	16
1.3.25 Poder calorífico superior	16
1.3.26 Poder calorífico inferior	16
1.3.27 Unidad de control del motor (ECU)	17
1.3.28 Doble árbol de levas (DOCH)	17
1.4 Biocombustibles	17
1.5 Definición del biodiésel	17
1.5.1 Materias primas para extraer biodiésel	19
1.6 Calidad del biodiésel	19
1.6.1 Viscosidad	21
1.6.2 Número de Cetano	21
1.6.3 Índice de cetano	21
1.6.4 Punto de inflamación “flash point”	22

1.6.5 Lubricidad	22
1.6.6 Punto de turbidez.....	22
1.7 Mezclas de biodiésel con diésel.....	22
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	24
2.1 Extracción del biodiésel.....	24
2.2 Preparación de las mezclas de diésel con biodiésel	25
2.3 Sistema de medición de desempeño	26
2.4 Sistema motor	28
2.5 Factores de corrección	29
2.6 Normativas SAE e ISO para el desarrollo de las pruebas.....	30
2.7 Análisis estadístico	31
CAPÍTULO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.....	32
3.1 Propiedades de las mezclas de biodiésel.....	32
3.2 Consumo específico de combustible (BSFC)	33
3.3 Potencia al freno	42
3.4 Torque al freno.....	51
3.5 Flujo de gases a través de los cilindros (Blowby).....	60
3.6 Consideraciones finales al utilizar biodiésel.....	62
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	73
Anexo A.....	73

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Parámetros de calidad del biodiésel [58]–[60]	20
Cuadro 2. Especificaciones técnicas del motor de combustión interna utilizado [73].....	28
Cuadro 3. Poder calorífico y viscosidad cinemática del diésel y mezclas de biodiésel.....	32
Cuadro 4. Factor de corrección según presión, humedad y temperatura ambiental.....	33
Cuadro 5. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B5 en comparación al diésel.	34
Cuadro 6. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B10 en comparación al diésel.	35
Cuadro 7. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B15 en comparación al diésel.	37
Cuadro 8. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B20 en comparación al diésel.	38
Cuadro 9. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B50 en comparación al diésel.	40
Cuadro 10. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B100 en comparación al diésel.	41
Cuadro 11. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B5 en comparación al diésel.....	43
Cuadro 12.. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B10 en comparación al diésel.....	45
Cuadro 13. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B15 en comparación al diésel.....	46
Cuadro 14. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B20 en comparación al diésel.....	48
Cuadro 15. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B50 en comparación al diésel.....	49

Cuadro 16. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B100 en comparación al diésel.	50
Cuadro 17. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B5 en comparación al diésel.	52
Cuadro 18. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B10 en comparación al diésel.	54
Cuadro 19. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B15 en comparación al diésel.	55
Cuadro 20. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B20 en comparación al diésel.	56
Cuadro 21. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B50 en comparación al diésel.	58
Cuadro 22. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B100 en comparación al diésel.....	59
Cuadro 23. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey para el blowby para cada una de las mezclas.	61

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de un motor diésel de cuatro cilindros [41].	7
Figura 2. Esquema principio de funcionamiento de un dinamómetro [42].	7
Figura 3. Esquema de un dispositivo cilindro pistón [39].	8
Figura 4. Reactor para la producción de biodiésel [67].	24
Figura 5. Calibrador volumétrico para realizar las mezclas de combustible.	25
Figura 6. Esquema banco de pruebas [68].	27
Figura 7. Diagrama de Ishikawa [75].	30
Figura 8. Consumo específico al freno versus giro del motor para B5.	34
Figura 9. Consumo específico al freno versus giro del motor para B10.	35
Figura 10. Consumo específico al freno versus giro del motor para B15.	36
Figura 11. Consumo específico al freno versus giro del motor para B20.	38
Figura 12. Consumo específico al freno versus giro del motor para B50.	39
Figura 13. Consumo específico al freno versus giro del motor para B100.	41
Figura 14. Potencia al freno versus giro del motor para B5.	43
Figura 15. Potencia al freno versus giro del motor para B10.	44
Figura 16. Potencia al freno versus giro del motor para B15.	46
Figura 17. Potencia al freno versus giro del motor para B20.	47
Figura 18. Potencia al freno versus giro del motor para B50.	49
Figura 19. Potencia al freno versus giro del motor para B100.	50
Figura 20. Torque al freno versus giro del motor para B5.	52
Figura 21. Torque al freno versus giro del motor para B10.	53
Figura 22. Torque al freno versus giro del motor para B15.	55
Figura 23. Torque al freno versus giro del motor para B20.	56

Figura 24. Torque al freno versus giro del motor para B50.	57
Figura 25. Torque al freno versus giro del motor para B100.	59
Figura 26. Flujo de gases a través de los cilindros obtenidos en los ensayos de cada uno de los combustibles estudiados.	61

Lista de Abreviaturas

Abreviatura Significado

B5	Mezcla de biodiésel al 5% y diésel al 95%
B10	Mezcla de biodiésel al 10% y diésel al 90%
B15	Mezcla de biodiésel al 15% y diésel al 85%
B20	Mezcla de biodiésel al 20% y diésel al 80%
B50	Mezcla de biodiésel al 50% y diésel al 50%
B100	Biodiésel al 100%
BXX	Mezcla de biodiésel donde XX indica el porcentaje de biodiésel en la mezcla
Blowby	Flujo a través de los cilindros hacia al cárter
BSFC	Consumo específico de combustible
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Coefficiente de variación.
ECU	Unidad de control electrónico
NO _x	Óxidos de nitrógeno
P _b	Potencia al freno
PMI	Punto muerto inferior del pistón
PMS	Punto muerto superior del pistón
T _b	Torque al freno

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento de un motor de combustión interna de encendido por compresión utilizando diferentes mezclas de diésel con biodiésel. Se midió el consumo específico de combustible (BSFC), la potencia al freno y el torque al freno utilizando B5, B10, B15, B20, B50 y B100 dichos resultados se compararon respecto al combustible diésel. El consumo específico disminuyó para todas las mezclas excepto para B10, la mezcla que presentó un menor BSFC fue B15 la cual tuvo una disminución del 24,9% debido a que presentó un mayor poder calórico y una baja viscosidad. Para todas las mezclas se obtuvo una disminución del torque y la potencia; al trabajar con mezclas menores al 20% el torque y la potencia disminuye a partir de las 3000 rpm. Al aumentar el porcentaje de biodiésel en las mezclas se da una mayor disminución de la potencia y el torque, debido al aumento en la viscosidad y la disminución en el poder calórico. Al utilizar biodiésel puro se tiene la mayor disminución de torque y potencia de un 11,8%. La mezcla que presentó los mejores resultados fue la de biodiésel a un 15%, debido a que presentó la mayor disminución en BSFC, además de que la potencia y el torque al freno únicamente disminuyeron a 4000 rpm.

INTRODUCCIÓN

La energía es un aspecto básico y fundamental para el desarrollo económico de cualquier país. Cualquier sector económico ya sea, agricultura, industria, transporte, sectores comerciales y domésticos requieren de energía [1]. En Costa Rica la energía comercial que se consume, se compone de aproximadamente un 63% de derivados del petróleo, un 20% de electricidad, 9% de biomasa, 6% de leña y un 2% carbón vegetal y otros [2].

Los derivados del petróleo constituyen la principal fuente energética en el país, un 79% lo consume el sector transporte, un 9% lo consume el sector industrial y un 11% otros sectores [2]. El diésel es el combustible de mayor consumo, pues representa el 37% de las ventas nacionales [3].

El aumento de los precios de los combustibles fósiles, su impacto en el medio ambiente con las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia que tiene la economía de los países con estos, ha provocado la necesidad de buscar nuevas alternativas que puedan sustituir a los combustibles fósiles [4].

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico, que aparecieron como parte solución a los problemas que se enfrenta el mundo con la emisión de gases de efecto invernadero y como una fuente alternativa a los combustibles fósiles.

El biodiésel es actualmente el combustible alternativo más aceptado para motores diésel debido a sus ventajas técnicas y ambientales [5]. Factores como una mayor eficiencia de combustión, un alto número de cetano, menos emisiones de CO, hacen que el biodiésel sea una solución más atractiva para utilizarlo como combustible en los motores diésel [6].

El biodiésel es un biocombustible líquido, amigable con el medio ambiente, que puede utilizar cualquier motor diésel sin tener que realizar modificaciones. Es menos contaminante y renovable si se compara con el combustible diésel convencional, además es completamente miscible con el diésel de petróleo, permitiendo la mezcla de estos dos combustibles en cualquier cantidad [5], [7].

Debido a la tendencia mundial de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, en el 2015 se publicó “El VII Plan Nacional de Energía 2015-2030” [8], el cual establece que la política energética de los próximos años debe ir orientada en promover el uso de combustibles alternativos en el sistema de transporte para disminuir la dependencia de los hidrocarburos y la emisión de gases contaminantes.

RECOPE como empresa abastecedora de combustibles fósiles ha venido adaptándose a los cambios y nuevas tendencias mundiales del uso de la energía [9], el Departamento de Investigación en su Laboratorio de Motores realiza pruebas de combustibles fósiles con combustibles alternativos en el cual el biodiésel será el combustible de estudio de este trabajo.

Los estudios [10]–[12] indican que el biodiésel de palma tiene un poder calorífico entre 9% a 12% más bajo que el diésel convencional; al aumentar el porcentaje de mezcla de biodiésel se tiene una disminución en torque y un aumento en el consumo específico de combustible (BSFC). Del mismo modo, en [13] indican que para las mezclas B10, B20 y B30 la potencia disminuye 0,5%, 1,6%, 2,7% y el BSFC aumenta 1%, 2,1% y 3%, respectivamente.

Las investigaciones [14], [15] indican que el bajo poder calorífico del biodiésel se debe a su alto contenido de oxígeno, al utilizar B10 y B20 la potencia disminuye 2,3% y 10,7% y el BSFC incrementa 19% y 26,4%, respectivamente. En [16] estudiaron el comportamiento del biodiésel a partir de aceite de coco y palma al 5% cada uno, teniendo una disminución en potencia de 0,7% y 1,2%, respectivamente, debido al bajo poder calorífico. Ozsezen y Canakci [17] encontraron que al utilizar B100 el consumo aumenta 10% en comparación con el diésel.

Al utilizar biodiésel puro de palma la potencia disminuye en un 16% y el consumo específico de combustible incrementa en un 16% [18]. En [19], encontraron una disminución del torque del 5,3% y un incremento del BSFC de 10% para B100 en comparación con el diésel. Canakci [20] determinó que para mezclas de biodiésel de soya al B20 y B100 el consumo de combustible aumenta 2,8% y 13,9%, respectivamente.

En [21] realizaron un estudio con mezclas de biodiésel al B10 y B20, concluyendo que al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla se da un aumento del BSFC, lo cual concuerda con Qi *et al* [22], los cuales indican que el biodiésel al tener un menor poder calorífico, se requiere aumentar la cantidad de combustible inyectado para producir la misma cantidad de potencia, por ello el consumo de combustible es más alto. Por el contrario, Alloune *et al* [23] indican que el B30 presenta un menor consumo de combustible en comparación al diésel, a pesar de que el poder calórico es un 4% menor. La mezcla presenta un mayor número de cetano que contribuye a disminuir el BSFC, además de que presenta un mayor contenido de oxígeno que ayuda a mejorar la combustión.

En [24] mencionan que las propiedades del biodiésel, especialmente el poder calorífico, la viscosidad y la lubricidad, tienen un efecto importante en la potencia del motor. Según [25] indica que la potencia y el torque disminuyen entre un 3% a 5% en comparación al diésel, debido a que tiene menos energía por unidad de volumen en comparación con el diésel convencional.

Según [26] para B5 y B10 se tiene una disminución del torque de 12,5% y un 6% de potencia, debido a su bajo poder calorífico, además de su elevada viscosidad y densidad, teniendo como resultado pobres características de pulverización de combustible.

Las investigaciones [27]–[29] mencionan que la densidad y la viscosidad, afectan el proceso de pulverización y mezclado del combustible con el aire, provocando una combustión pobre, conduciendo a una menor potencia y mayor consumo de combustible. Además, indican que el consumo de combustible aumentó para todas las mezclas, respecto al diésel. Para B10 y B20 se tiene una disminución de la potencia de 4,19% y 10,48%, y un incremento del consumo de 3,81% y 7,13% respectivamente [27]. Efe *et al* [30] indican que al haber una mala pulverización del combustible se da una combustión incompleta y conduce a una reducción de la potencia.

Ozsezen *et al* [31] concluyen que para mezclas de biodiésel de palma (B5, B20, B50 y B100), conforme aumenta el contenido de biodiésel en mezcla, el torque disminuye 2,01%, 4,28%,

5,16% y 7,16%, y el consumo específico aumenta 2,17%, 5,78%, 9,42%, 16,76%, respectivamente.

Chauhan *et al* [32] indican que hay un aumento del BSFC, al aumentar el contenido de biodiésel en mezcla, debido al efecto de la densidad, viscosidad y menor poder calorífico. La mayor densidad del biodiésel lleva a una mayor descarga de combustible por un mismo desplazamiento de la bomba de combustible.

De la literatura revisada, algunos investigadores sostienen que al utilizar mezclas de biodiésel las prestaciones se mantienen en comparación al diésel. Según [33] la potencia se mantiene en mezclas menores al B10. Al igual [34], indica que la potencia aumenta ligeramente para B10, además destacan que el incremento del BSFC no es elevado, debido a la naturaleza oxigenada del biodiésel, lo cual, conduce a una mejor combustión. En [35] encontraron que al utilizar B20 y B40 el consumo específico disminuye 4,28% y 2,26% respectivamente en comparación con el diésel.

Raheman y Phadataré [36] indican que para las mezclas B20 y B40 el torque aumenta 0,1% y 13% respectivamente; mientras que para B60 y B100 disminuye 4% y 23%, respectivamente debido a una disminución del poder calorífico. El BSFC fue menor al utilizar B20 y B40 en un 0,8 y 7,4%, respectivamente; mientras que para las mezclas B60 y B100 hubo un aumento de 11 y 48%, en comparación al combustible diésel. Panwar *et al* [37] muestra que bajos porcentajes de biodiésel (menores al 10%) aumenta la eficiencia térmica y disminuye el consumo específico.

La empresa RECOPE junto con la Escuela de Ingeniería en Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, realizan un convenio para conocer el comportamiento de mezclas de biodiésel con diésel a partir de diferentes materias primas disponibles en el país. Este trabajo contribuye para avanzar en materia de investigación respecto al uso de fuentes alternativas de energía que puedan sustituir a los combustibles fósiles además de que permite impulsar el uso de combustibles alternativos a nivel nacional.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el comportamiento de un motor de combustión interna, utilizando diferentes mezclas de diésel con biodiésel, para establecer las mejores mezclas que posibiliten el uso en el parque vehicular costarricense.

Objetivos específicos

- I. Determinar el comportamiento del consumo de combustible de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%.
- II. Determinar el comportamiento de la potencia de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%.
- III. Determinar el comportamiento del torque de un motor de combustión interna con diferentes mezclas de biodiésel, para su análisis con respecto al comportamiento del motor usando diésel al 100%.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades del motor diésel

El motor diésel es un motor de encendido por compresión en el cual el combustible y el aire se mezclan dentro del motor. El aire requerido para la combustión es altamente comprimido dentro de la cámara de combustión, generando altas temperaturas superiores a la temperatura de autoencendido, provocando que el combustible se encienda espontáneamente cuando se inyecta en el cilindro [38].

Los motores diésel son ampliamente utilizados debido a su excelente manejabilidad y eficiencia térmica. Se utilizan en automóviles, camiones pesados, autobuses urbanos, locomotoras, generadores de electricidad, equipos agrícolas, equipos de minería, entre otros [1].

La combustión de la mezcla aire combustible, es la que se encarga de que cada pistón en cada cilindro realice movimientos hacia arriba y hacia abajo [38]. Esta serie de movimientos se repite periódicamente y constituyen un ciclo termodinámico, que se resumen en cuatro etapas básicas: admisión, compresión, expansión (potencia) y escape. La biela convierte la acción reciprocante lineal del pistón en un movimiento de rotación en el cigüeñal [39].

Los gases de escape de un motor diésel son altamente nocivos para el medio ambiente, dentro de estos gases se encuentra el óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y material particulado (PM, por sus siglas en inglés), conocido como hollín [40].

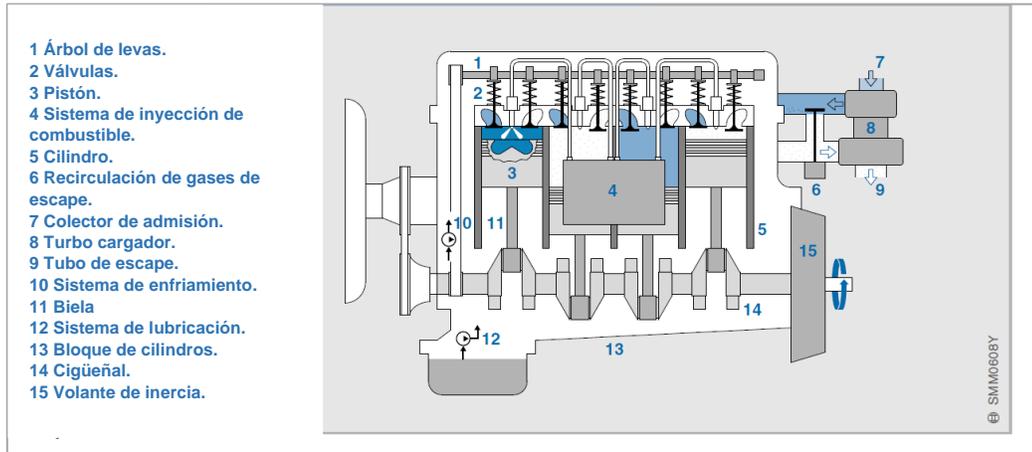
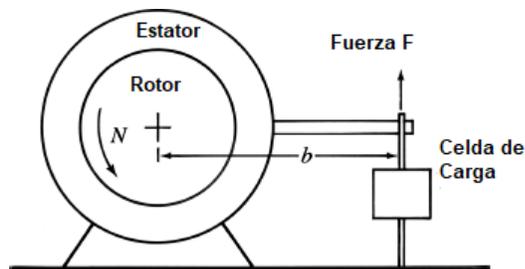


Figura 1. Esquema de un motor diésel de cuatro cilindros [41].

1.2 Medición del rendimiento del motor

Para medir el desempeño del motor se requiere conocer de algunas relaciones geométricas y algunos parámetros básicos para cuantificar el funcionamiento del motor [42].

El desempeño de un motor se mide acoplándolo a un dinamómetro. La función del dinamómetro es, imponer condiciones de carga variable en el motor, lo que permite la medición precisa del torque y la potencia de salida del mismo [43].



N: Velocidad angular del rotor.
 b: Radio de manivela del cigüeñal

Figura 2. Esquema principio de funcionamiento de un dinamómetro [42].

1.3 Características importantes del motor

1.3.1 Relación de compresión

La relación de compresión se define como el cociente entre el volumen máximo y el volumen mínimo formado en el cilindro [44]. Cuando se forma el menor volumen dentro del cilindro, es cuando el pistón se encuentra en una posición conocida como punto muerto superior (PMS), y la posición del pistón donde se forma el mayor volumen dentro del cilindro es conocida como punto muerto inferior (PMI). El pistón reciprocante se alterna entre estas dos posiciones el PMS y el PMI (ver Figura 3) que a su vez es la máxima distancia que recorre y recibe el nombre de carrera del motor [39].

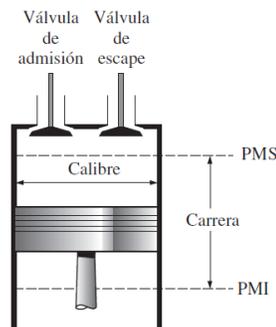


Figura 3. Esquema de un dispositivo cilindro pistón [39].

La relación de compresión se puede determinar mediante la siguiente ecuación [39]:

$$r_c = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} \quad (1)$$

donde:

r_c : Relación de compresión (adimensional).

$V_{m\acute{a}x}$: Volumen máximo dentro del cilindro (cm^3).

$V_{m\acute{i}n}$: Volumen mínimo dentro del cilindro (cm^3).

Valores típicos de relación de compresión para motores de encendido por compresión (motor diésel) se encuentra entre los 14 a 22 [42].

1.3.2 Potencia indicada

Es la potencia desarrollada en el cilindro del motor por el fluido de trabajo al ejercer presión sobre el pistón [45].

La combustión del combustible produce una alta presión en cada pistón que, cuando se multiplica por el área del pistón genera una fuerza. Aunque la presión varía a lo largo de la carrera del pistón, es posible calcular una presión media efectiva. Multiplicando la fuerza por la carrera del pistón se obtiene el trabajo por ciclo del motor. Finalmente, multiplicando por el número de ciclos por unidad de tiempo, es decir, la velocidad del cigüeñal, se obtiene la potencia indicada [46]:

$$P_i = \frac{PME \cdot D_e \cdot N}{120000} \quad (2)$$

donde:

P_i : Potencia indicada (kW).

PME: Presión media efectiva (kPa).

D_e : Desplazamiento del motor (dm^3).

N: Velocidad del cigüeñal (rpm).

El desplazamiento del motor (D_e), se puede calcular de la siguiente manera:

$$D_e = \frac{A_p \cdot L \cdot n}{1000} \quad (3)$$

donde:

D_e : Desplazamiento del motor (dm^3).

A_p : Área superior del pistón (cm^2).

L: Longitud de la carrera, (cm).

n: Número de cilindros del motor (adimensional).

El desplazamiento del motor se puede dar en m^3 , cm^3 , in^3 , sin embargo, la manera más común es expresarlo en litros (L).

1.3.3 Presión media efectiva

Si bien el torque es una medida valiosa de la capacidad de un motor en particular para trabajar, depende del tamaño del motor. Una medida de rendimiento relativo más útil del motor se obtiene al dividir el trabajo por ciclo por el volumen del cilindro desplazado por ciclo. El parámetro así obtenido tiene unidades de fuerza por unidad de área y se denomina presión media efectiva [42].

$$PME = \frac{P_i \cdot n_r \cdot 10^3}{D_e \cdot N} \quad (4)$$

donde:

P_i : potencia indicada (kW).

n_r : es el número de revoluciones del cigüeñal para cada carrera de potencia por cilindro (dos para motores de cuatro tiempos y uno para motores de dos tiempos).

N : número de revoluciones (rpm).

D_e : desplazamiento del motor (dm^3).

1.3.4 Torque al freno

Para la medición de la potencia de freno del motor, es necesario determinar el torque y la velocidad angular del eje de salida del motor (rpm). El motor se conecta a un dinamómetro que puede cargarse de tal manera que puede medir el torque ejercido por el motor. El dinamómetro es capaz de proporcionar un torque ajustable y medible opuesto al que ejerce

el motor [45]. Utilizando la notación de la Figura 2, el torque al freno ejercido por el motor se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$T = F \cdot b \quad (5)$$

donde:

T: Torque al freno o par motor (N·m).

F: Fuerza sobre la biela (N).

b: Radio de manivela del cigüeñal (m).

El torque incrementa al aumentar la velocidad del motor hasta un valor máximo, después de ese punto al aumentar la velocidad, se da una disminución de este [38].

1.3.5 Potencial al freno

La potencia entregada por el motor que es absorbida por el dinamómetro es el producto del torque al freno y la velocidad angular [42]. La potencia al freno viene dada por [46]:

$$P_b = \frac{2\pi \cdot T_b \cdot N}{60000} \quad (6)$$

donde:

P_b: Potencial al freno (kW).

T_b: Torque al freno (N·m).

N: Velocidad angular del cigüeñal (rpm).

1.3.6 Potencia de fricción

La potencia de fricción es la diferencia entre la potencia indicada y la potencia de freno, como se describe a continuación [46]:

$$P_f = P_i - P_b \quad (7)$$

donde:

P_f : Potencia de fricción (kW).

P_i : Potencia indicada (kW).

P_b : Potencia de freno (kW).

1.3.7 Potencia del combustible

El combustible es la fuente de poder del motor. La potencia incorporada en el combustible se denomina potencia equivalente de combustible y está dada por [46]:

$$P_{fe} = \frac{\dot{m}_f \cdot H_g}{3600} \quad (8)$$

donde:

P_{fe} : Potencia equivalente del combustible (kW).

\dot{m}_f : Tasa de consumo de combustible (kg/h).

H_g : Poder calorífico del combustible (kJ/kg).

1.3.8 Consumo específico de combustible (BSFC)

El consumo específico de combustible al freno BSFC (por sus siglas en inglés), se define como la masa de combustible que requiere el motor para realizar una cantidad específica de trabajo (kWh) [38]. Mide cuanta de la energía del combustible se convierte en trabajo [42] y se determina dividiendo la cantidad de combustible utilizado entre la potencia al freno generada por el motor [47], como se presenta en la ecuación (9):

$$BSFC = \frac{m_c}{P_b} \quad (9)$$

donde:

BSFC: Consumo específico de combustible al freno (g/kWh).

m_c : Flujo de masa (g/h).

P_b : Potencia al freno (kW).

1.3.9 Eficiencia global

La eficiencia global se define como la capacidad que tiene el motor para aprovechar la energía del combustible, se determina dividiendo la potencia al freno entre la potencia del combustible [46]:

$$e_{bt} = \frac{P_b}{P_{fe}} \quad (10)$$

donde:

e_{bt} : Eficiencia global.

P_b : Potencia al freno (kW).

P_{fe} : Potencia del combustible (kW).

1.3.10 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica se denomina como la eficiencia de conversión del combustible, ya que, se define como la relación entre el trabajo producido por ciclo y la cantidad de energía de combustible suministrada por ciclo que puede liberarse en el proceso de combustión [43]:

$$e_{it} = \frac{P_i}{P_{fe}} \quad (11)$$

donde:

e_{it} : Eficiencia global.

P_i : Potencia indicada (kW).

P_{fe} : Potencia del combustible (kW).

1.3.11 Presión de combustible (presión de inyección):

Es la presión del combustible justo antes de salir de los orificios de la boquilla del inyector [40]. El sistema de inyección induce presión sobre el combustible para inducir el

flujo de este a través de los inyectores. La pulverización del combustible es causada por la colisión del flujo turbulento con el aire dentro del cilindro [41].

1.3.12 Tiempo de inyección

Es el intervalo de tiempo entre el inicio de la inyección y el punto muerto superior (PMS) del pistón del motor, en la carrera de compresión. El tiempo de inyección tiene una gran influencia en la presión de inyección, el proceso de combustión y prácticamente todas las emisiones del motor [40].

1.3.13 Temperatura de refrigerante

A medida que aumenta la temperatura del refrigerante de un motor, aumenta la temperatura de todos los componentes refrigerados del motor [45]. A medida que la temperatura del refrigerante aumenta la viscosidad del aceite disminuye, por lo cual las pérdidas por fricción son menores.

1.3.14 Temperatura de los gases de escape

La temperatura de los gases de escape indica el uso efectivo de la energía térmica del combustible. El aumento en la temperatura de los gases de escape reduce la conversión de la energía térmica del combustible para realizar trabajo [31].

1.3.15 Flujo a través de los cilindros (Blowby)

Es el fenómeno que describe el escape de la mezcla de aire combustible sin quemar y los gases quemados desde la cámara de combustión, pasando por el pistón y los anillos hasta el cárter [45].

1.3.16 Inyección de riel común

En el sistema de inyección de riel común conocido como “Common Rail”, la presión de inyección se obtiene independientemente del número de revoluciones del motor y es generada por una bomba de alta presión [41].

1.3.17 Inyección directa de combustible

Inyección directa de combustible tiene una mayor eficiencia y son más económicos que los motores de inyección indirecta. El proceso de inyección directa consiste en inyectar directamente el combustible en la cámara de combustión [38].

La inyección directa requiere de altas presiones (hasta los 2200 bar) [38].

1.3.18 Motor de aspiración natural

El aire se introduce en el motor a presión atmosférica o ligeramente inferior a ésta, debido a las pérdidas por fricción [48].

1.3.19 Turbo

Los turbocompresores son utilizados para aumentar la potencia máxima que se puede obtener de un motor. La transferencia de trabajo al pistón por ciclo, en cada cilindro, que controla la potencia que puede entregar el motor, depende de la cantidad de combustible quemado por cilindro por ciclo. Esto depende de la cantidad de aire fresco que se induce en cada ciclo. El aumento de la densidad del aire antes de ingresar al motor aumenta la potencia máxima que puede proporcionar un motor de desplazamiento determinado [42].

1.3.20 Interenfriador

El aire al ser comprimido aumenta la temperatura (hasta 180 °C), el cual es menos denso que el aire frío, produciendo un efecto negativo en la carga del cilindro. Un enfriador de aire de carga (intercooler) aguas abajo del turbocompresor (enfriado por aire ambiente o con un circuito de refrigerante separado) enfría el aire comprimido, aumentando la carga de aire del cilindro, lo cual conlleva a que haya más oxígeno disponible para la combustión, obteniendo un mayor torque y potencia de salida a una velocidad determinada del motor [41].

1.3.21 Ralentí

El motor está en ralentí cuando está funcionando a la velocidad más baja sin carga. El pedal del acelerador no está presionado. El motor no produce ningún par, solo supera su fricción interna [41].

1.3.22 OBD II

Es un sistema de diagnóstico a bordo (ODB por sus siglas en inglés) en vehículos, con el fin de que estos deban cumplir con los límites de emisiones de escape que determine la ley. OBD II estipula que deben controlarse todos los sistemas y componentes relacionados, que por un mal funcionamiento aumente la toxicidad de los gases de escape [41].

1.3.23 Map Sensor

El sensor de presión absoluta (Map sensor por sus siglas en inglés), se utiliza para medir la presión del múltiple de admisión. Los valores típicos de medición se encuentran en un rango de 0,2-1,1 bar [44].

1.3.24 Orden de encendido del motor

Es la secuencia en la que se inicia la combustión en los cilindros. En un motor multicilíndrico, los cilindros deben realizar su tiempo de combustión en el orden correcto. Por lo que se han establecido convenciones con respecto a la numeración de los cilindros. La numeración de los cilindros se da desde la parte frontal (donde se encuentran las poleas de los accesorios) hasta la parte trasera del motor (cigüeñal) [46].

1.3.25 Poder calorífico superior

Se refiere al calor liberado en la combustión tomando en cuenta la energía para vaporizar el agua [49].

1.3.26 Poder calorífico inferior

Se refiere al calor liberado sin tomar en cuenta la energía para vaporizar el agua [49].

1.3.27 Unidad de control del motor (ECU)

La unidad de control del motor (ECU por sus siglas en inglés) administra varios aspectos del funcionamiento del motor. Es la centralita que monitorea todos los sensores y controla los actuadores del motor [50]. La ECU puede producir salidas, generalmente en forma digital para provocar una acción, por ejemplo, para establecer la posición de una válvula hidráulica o encender o apagar un motor.

1.3.28 Doble árbol de levas (DOCH)

Doble árbol de levas (DOCH por sus siglas en inglés); es un tipo de tecnología que busca mejorar la apertura y cierre de las válvulas y hacer más eficiente el motor en el llenado de los cilindros con aire y en la evacuación de los gases de escape [50].

1.4 Biocombustibles

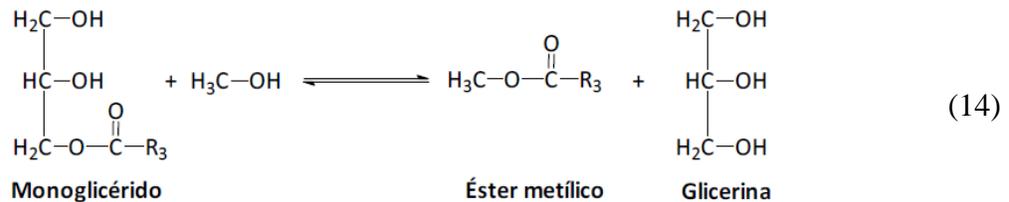
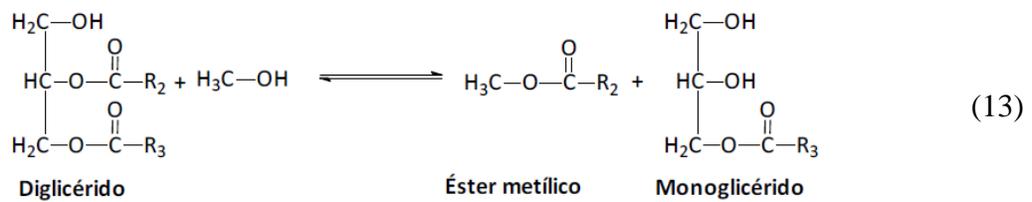
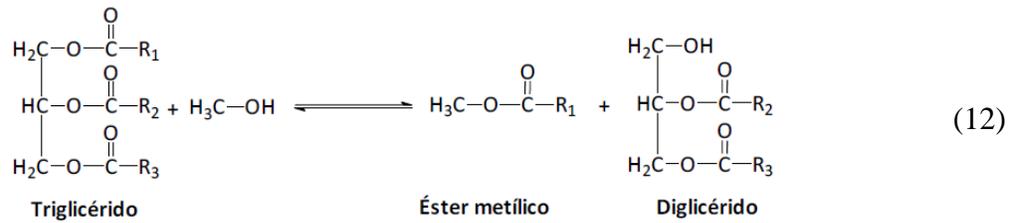
Los biocombustibles son combustibles derivados de biomasa, estos pueden ser gaseosos o líquidos, como el bioetanol, el biodiésel, el biogás, entre otros [51]. Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes son utilizados en motores de combustión interna (motores diésel y gasolina), dentro de estos encontramos actualmente el biodiésel y el bioetanol [52].

1.5 Definición del biodiésel

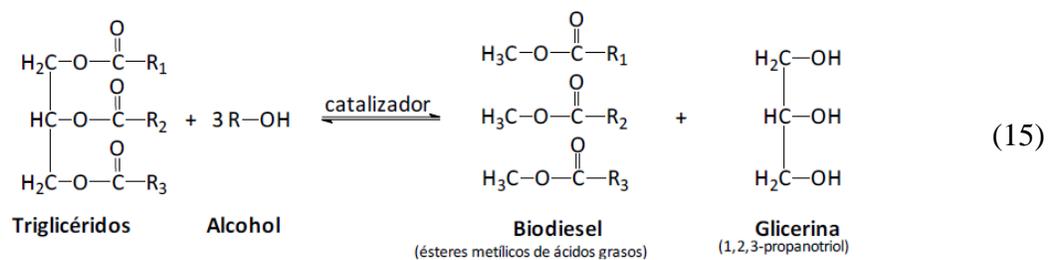
El biodiésel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales. Químicamente se define como un combustible de ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables [53].

El proceso más común para producir biodiésel es mediante una reacción de transesterificación, la cual disminuye la viscosidad del aceite vegetal, para que sea más apto para utilizarlo en los motores diésel y que no haya problemas en los sistemas de inyección del motor.

La transesterificación es una reacción química de un aceite o una grasa con un alcohol de cadena corta, en presencia de un catalizador para formar ésteres y glicerol. Implica una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas, en la que los triglicéridos se convierten en diglicéridos y luego se convierten en monoglicéridos, seguido de la conversión de los monoglicéridos en glicerol [1], como se muestra a continuación:



La reacción general es la siguiente:



Los alcoholes que se pueden utilizar en las reacciones de transesterificación pueden ser metanol, etanol, propanol y butanol. El metanol y butanol son los más utilizados, debido a su bajo costo [1].

La reacción de transesterificación requiere de un catalizador que puede ser homogéneo como el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH) y el ácido sulfúrico, o catalizadores heterogéneos como los óxidos metálicos o carbonatos. El hidróxido de sodio es muy utilizado, debido a su bajo costo y altos rendimientos [54]. Los catalizadores son utilizados para mejorar la velocidad de la reacción y el rendimiento.

La materia prima utilizada para el proceso de fabricación del biodiésel es muy variada, haciendo que el resultado de la reacción química correspondiente sea una multiplicidad de ésteres de ácidos grasos distintos, en proporciones muy variables, todos ellos denominados biodiésel [55]. La toma de decisión para decidir con cuál biomasa trabajar para extraer biodiésel dependerá de la disponibilidad de la biomasa, rendimiento, costo de oportunidad, la competencia con el mercado de alimentos y el balance ambiental de emisiones y de energía [56].

Dependiendo de la disponibilidad y la producción de la materia prima, el biodiésel se puede clasificar en tres categorías: el que es producido a partir de plantas, grasas de animales y aceite de cocina reciclado [57].

1.5.1 Materias primas para extraer biodiésel

Cómo se mencionó anteriormente el biodiésel se puede extraer de aceites vegetales y grasas animales. Los aceites vegetales pueden ser extraídos de cultivos agroalimentarios como por ejemplo la soya o la palma, o de cultivos energéticos como el caso de la jatropha.

1.6 Calidad del biodiésel

El biodiésel es un combustible oxigenado, con bajo contenido de azufre, biodegradable, no tóxico y ecológico [40]. La norma ASTM D6751 establece una serie de parámetros de calidad que debe cumplir el biodiésel para poder ser utilizado en mezclas con diésel en motores.

Los parámetros que definen la calidad del biodiésel, se dividen en dos grupos: el primero de ellos contiene los parámetros generales que también se utilizan para el diésel fósil, mientras que el otro grupo está más relacionado con composición química y la pureza de los ésteres alquílicos de los ácidos grasos [57].

Cuadro 1. Parámetros de calidad del biodiésel [58]–[60]

Propiedades	Método de ensayo	Unidades	Valores Biodiésel	Importancia
Contenido de ésteres	EN 14103	Fracción de masa (% de masa)	96,5% mínimo	Emisiones
Densidad a 15 °C	ASTM D4052 ASTM D1298	kg/m ³	Reportar	Bombeo del combustible
Punto de inflamación (Flash point)	ASTM D93	°C	130 °C mínimo	Encendido
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D445	mm ² /s	1,9-6,5	Bombeo del combustible
Número de Cetano	ASTM D613	adimensional	47 mínimo	Encendido
Punto de turbidez	ASTM D2500	°C	Reportar	Encendido a bajas temperaturas
Índice de acidez	ASTM D664	mg KOK/g	0,5 máximo	Estabilidad del almacenamiento
Glicerina libre	ASTM D6584	Fracción de masa (% de masa)	0,02% máximo	Bombeo del combustible
Glicerina total	ASTM D6584	Fracción de masa (% de masa)	0,240% máximo	Bombeo del combustible

1.6.1 Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades más importantes, debido a que afecta la operación del equipo de inyección, a bajas temperaturas aumenta, afectando la pulverización del combustible [7].

1.6.2 Número de Cetano

Este parámetro relaciona el tiempo que transcurre entre el inicio de la inyección del combustible con el cilindro del motor, y la ignición por compresión del diésel. Cuanto mayor sea el índice de cetano, más rápida será la ignición y más estable será la combustión [61].

Este parámetro se puede medir en un motor de prueba especialmente diseñado de acuerdo a la norma ASTM D613 [62].

1.6.3 Índice de cetano

El índice de cetano (CI por sus siglas en inglés) es un valor calculado a partir de la densidad y la volatilidad obtenidas de las características de ebullición de un combustible. El CI da una aproximación cercana al número de cetano real.

La norma ASTM D976-06 [59] establece una ecuación para determinar el CI:

$$CI = -420,34 + 0,016 \cdot G^2 + 0,192 \cdot G \cdot (\log_{10} M) + 65,01 \cdot (\log_{10} M)^2 - 0,0001809 \cdot M^2 \quad (16)$$

El índice de cetano también se puede calcular con la siguiente ecuación [59]:

$$CI = 454,74 - 1641,416 \cdot D + 774,74 \cdot D^2 - 0,554 \cdot B + 97,803 \cdot (\log_{10} B)^2 \quad (17)$$

donde:

G: Gravedad API, determinada por el método de prueba ASTM D287, D1298 o D4052.

M: Temperatura de ebullición promedio (°F), determinada por el método de prueba ASTM D86.

D: Densidad a 15 °C (g/ml), determinada por el Método de prueba ASTM D1298 o D4052.

B: Temperatura de ebullición promedio (°C), determinada por el método de prueba ASTM D86.

1.6.4 Punto de inflamación “flash point”

Es la menor temperatura a la cual el combustible líquido genera vapores suficientes para mezclarse con aire e inflamarse por la acción de una llama que actúa como fuente de ignición [61].

1.6.5 Lubricidad

Es un parámetro muy importante en los sistemas de inyección, es la capacidad que tiene un combustible de actuar como un lubricante [63].

1.6.6 Punto de turbidez

Define la temperatura a la cual aparece una nube o neblina de cristales en el combustible bajo condiciones de prueba determinadas que generalmente se relacionan con la temperatura a la cual los cristales comienzan a precipitar con el combustible en uso. El biodiésel tiene un punto de turbidez superior al del diésel a base de petróleo [60].

1.7 Mezclas de biodiésel con diésel

El biodiésel puede mezclarse y utilizarse en diferentes concentraciones con diésel. El documento aprobado por el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA), llamado “Biocombustibles. Biodiésel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diésel. Especificaciones”, establece que el producto de la relación de mezcla de hasta un 0,05 de fracción de volumen (5 % de volumen) de biodiésel con aceite combustible diésel, debe cumplir con las especificaciones del RTCA 75.02.17:06 “Productos de Petróleo. Aceite Combustible Diésel. Especificaciones” [64].

Según la normativa estadounidense, el biodiésel para ser utilizado, debe cumplir con la norma ASTM D6751 [65]. Mezclas de biodiésel con diésel de petróleo en concentraciones de hasta

un 5% en volumen (B5), si cumplen con la norma ASTM D975-18a, se puede utilizar en cualquier aplicación como diésel de petróleo puro.

Para concentraciones de biodiésel de 6% hasta 20% en volumen (B6 y B20 respectivamente), debe de cumplir con la norma ASTM D7467-18, para poder utilizarse en motores sin necesidad de modificaciones [66].

Las mezclas de uso común se limitan a B20 en los Estados Unidos porque este nivel proporciona un buen equilibrio entre la compatibilidad de los materiales, la operatividad en climas fríos, el rendimiento y los beneficios en las emisiones [65]. Concentraciones mayores al 20% se podrán utilizar únicamente si las especificaciones técnicas del equipo lo permiten.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Extracción del biodiésel

La extracción del biodiésel se realizó en la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata, ubicada en Ochomogo de Cartago, donde se encuentra una planta a escala piloto. Esta planta pertenece a la Red de Investigación en Desarrollo y Eficiencia Energética y Energía Renovable (RIDER) la cual es operada por la escuela de Ingeniería en Biosistemas.

La planta opera por baches, cada bache requiere 378,5 L de aceite, 75,7 L de metanol con una pureza del 99,9%, 4720 g de hidróxido de potasio (KOH) y 380 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4). En la Figura 4 se muestra el reactor donde se llevó a cabo la reacción para obtener el biodiésel.



Figura 4. Reactor para la producción de biodiésel [67].

La materia prima de la cual se extrajo el biodiésel fue de oleína de palma, como se mencionó anteriormente se necesitaron 378,5 L de aceite, estos se agregaron al reactor y se puso a

calentar por un periodo de 24 h, luego se calentó 4 h más con agitación, ambos procesos se realizaron a una temperatura de 60 °C.

Se agrega el hidróxido de potasio al reactor y seguidamente se agrega el metanol, primero se da una reacción de esterificación por un tiempo de aproximadamente 1 h, luego en las siguientes 8 h se da la reacción de transesterificación de la cual se obtiene el biodiésel y la glicerina.

2.2 Preparación de las mezclas de diésel con biodiésel

La preparación de las mezclas y la realización de las pruebas de torque, potencia y consumo de combustible, se realizaron en el Laboratorio de Motores del Departamento de Investigación de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), ubicada en Ochomogo de Cartago.

Las diferentes mezclas de diésel con biodiésel se realizaron en un calibrador volumétrico, conocido como “serafín”, que tiene un volumen de 20 L.



Figura 5. Calibrador volumétrico para realizar las mezclas de combustible.

Las mezclas se realizaron con biodiésel y diésel en distintos porcentajes de estos, en relación volumétrica. Las mezclas se realizaron con el diésel convencional que se vende en todas las estaciones de servicio el cual se conoce como diésel de bajo contenido de azufre, ULSD por sus siglas en inglés que significa “ultra low sulfur diesel”.

Las mezclas de combustible con las que se trabajaron fueron: 5% biodiésel 95% diésel (B5), 10% biodiésel 90% diésel (B10), 15% biodiésel 85% diésel (B15), 20% biodiésel 80% diésel (B20), 50% biodiésel 50% diésel (B50), 100% biodiésel (B100) y diésel al 100% (ULSD) como combustible de referencia.

Las fracciones volumétricas se escogieron de acuerdo con la información brindada por el Reglamento Técnico Centroamericano y las normativas estadounidenses [60], [64], [66]. De acuerdo con dichas normativas el porcentaje máximo de biodiésel en la mezcla es del 20%, sin embargo, se decide trabajar con 50% y 100% de biodiésel, para observar el comportamiento del motor.

Se evaluó el desempeño del motor utilizando diésel al 100% (ULSD) para comparar el comportamiento de éste y las diferentes mezclas de diésel con biodiésel.

Todas las pruebas se realizaron aleatoriamente, para demostrar que la secuencia del uso de las mezclas no tiene algún efecto en los resultados del estudio. Se hicieron 3 réplicas para cada mezcla de combustible.

Se realizó un análisis químico a cada una de las mezclas de biodiésel en el Laboratorio Químico del Departamento de Investigación de RECOPE, se determinó la viscosidad y el poder calorífico de cada una de ellas.

Las mediciones de torque, potencia y consumo de combustible se tomaron a 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm, 3500 rpm y 4000 rpm.

2.3 Sistema de medición de desempeño

Para las pruebas de torque y potencia se utilizó un dinamómetro hidráulico, el cual se acopla al cigüeñal del motor. El sistema al llenarse con agua aplica una resistencia contraria al movimiento de giro natural del motor, expandiendo una celda de carga que convierte las manifestaciones de fuerza a voltaje eléctrico, luego estos datos pasan a un control de procesamiento donde son interpretados como magnitudes físicas [50].

El sistema incluye mediciones de diferentes parámetros como el consumo específico de combustible (BSFC), torque (T_b), potencia (P_b), revoluciones por minuto (rpm), flujo a través de los cilindros al depósito de aceite del motor (blowby), temperatura, humedad relativa y presión ambiental. Esta información se refleja en las pantallas digitales del panel de control, así como en la computadora personal [50].

En la Figura 6 se muestra un diagrama del banco dinamométrico que se utilizó para desarrollar las pruebas.

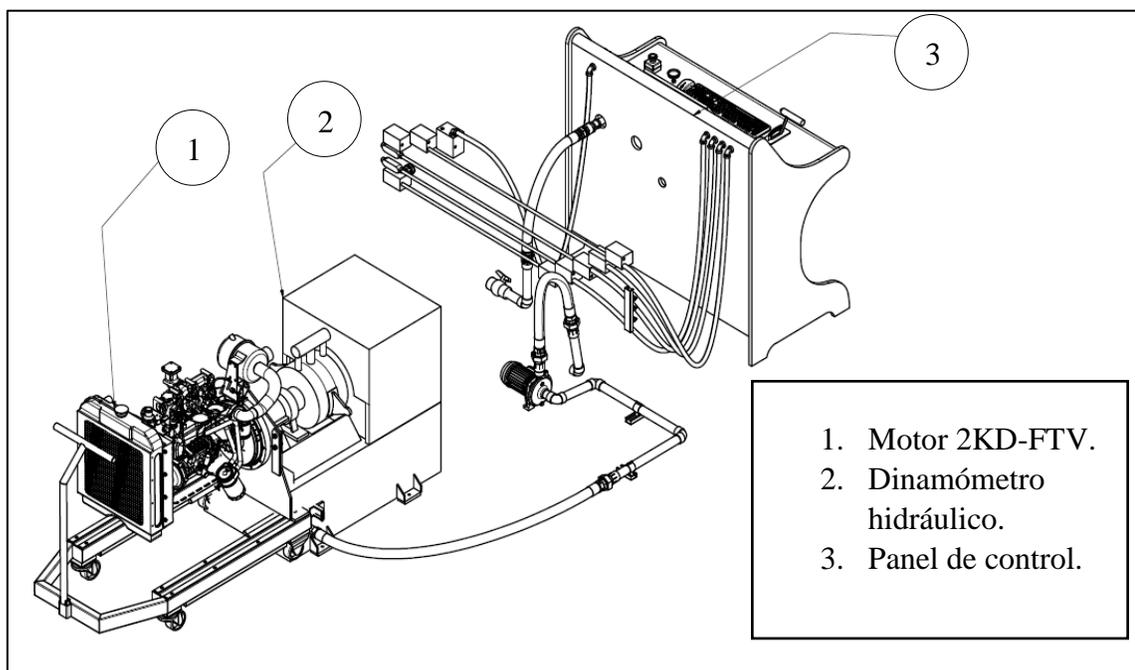


Figura 6. Esquema banco de pruebas [68].

Las mediciones se realizan una vez que el motor alcanzó la temperatura óptima de trabajo, luego, el motor es sometido a aceleración máxima y se procede a tomar las mediciones según la metodología utilizada por la norma ISO 1585 [69], además se consultó la metodología utilizadas por las normas SAE J1349 y SAE J1995 [70], [71] acerca de las condiciones de operación del motor, la cuál es similar a la indicada por la norma ISO 1585.

2.4 Sistema motor

Se utilizó un motor diésel, para el desarrollo de las pruebas de torque, potencia y consumo de combustible. En el Cuadro 2 se muestran las especificaciones técnicas de dicho motor. El motor utilizado representa a 26273 motores del parque vehicular costarricense [72].

Cuadro 2. Especificaciones técnicas del motor de combustión interna utilizado [73].

Diseño		Especificación
Marca		Toyota
Modelo		Hilux
Serie del motor		2KD - FTV
Tipo de motor		Encendido por compresión
Mecanismo de válvulas		DOCH 4 válvulas por cilindro
Sistema de combustión		Para Diésel
Inyección		Inyección directa- Common Rail
Entrada de aire		Turbo cargado
Desplazamiento		2494 cm ³
Relación de compresión		18,5:1
Orden de encendido		1-3-4-2
Diámetro cilindro		92 mm
Carrera		93,8 mm
Número de cilindros y arreglo		4 en línea
Potencia máxima neta		106kW@3400rpm
Par máximo		343 Nm@2800RPM
Presión de compresión	Estándar	27,5 kg/m ² (2,700 kPa, 391 psi) / 250 rpm
	Mínima	22,5 kg/m ² (2,200 kPa, 320 psi) / 250 rpm
	Limite diferencia entre cilindros	5,0 kg/m ² (500 kPa, 71 psi) / 250 rpm
Voltaje		14V
Refrigeración		Refrigerante de larga vida
Grado de aceite		SAE 20W50
Número de cetano		45 o mayor
Uso de Biodiesel		5% máximo

El fabricante indica que este motor puede utilizar biodiésel hasta un 5% en concentración volumétrica, ya que en concentraciones mayores pueden ocurrir problemas en el sistema de alimentación de combustible [73].

2.5 Factores de corrección

La presión, humedad y temperatura del aire del ambiente introducido en un motor, a una velocidad dada, afecta el flujo de la masa de aire y la potencia de salida. Los factores de corrección se utilizan para ajustar los valores medidos de la potencia a las condiciones atmosféricas estándar para proporcionar una base más precisa al hacer comparaciones entre los motores [42]. Es necesario, para fines de normalización, eliminar el efecto del ambiente, mediante la corrección de la potencia observada del motor [74].

La norma ISO 1585, brindan una serie de cálculos matemáticos para poder determinar el factor de corrección según las condiciones ambientales donde se desarrolle la prueba [69]:

$$P_{bc} = CA \cdot P_b \quad (18)$$

donde:

P_{bc} : es la potencia al freno corregida (kW).

CA: factor de corrección atmosférico (adimensional).

P_b : es la potencia bruta (kW).

El cálculo del factor de corrección atmosférico CA, se determina con la siguiente ecuación [69]:

$$CA = (Fa)^{Fm} \quad (19)$$

donde:

Fm: es el factor del motor el cual se puede consultar en el Cuadro A2 del Anexo A.

Fa: es el factor atmosférico (adimensional). Se determina con la siguiente ecuación [69]:

$$Fa = \left(\frac{99}{Pa}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^\beta \quad (20)$$

donde:

P_a : presión atmosférica (kPa).

T : temperatura ambiental (K).

Los factores α y β , se determinan según el sistema de carga de admisión del aire, los cuales se pueden consultar en el Cuadro A1 del Anexo A.

El factor de corrección se obtiene para cada mezcla, para cada una de las revoluciones en las que se tomaron las mediciones. Se determina el coeficiente de variación (COV) del factor de corrección en cada revolución para todas las mezclas incluyendo el diésel. El COV no debe ser mayor a 5% entre los factores de corrección [69], [70], para validar que las condiciones ambientales en las que se realizó el ensayo fueron similares.

2.6 Normativas SAE e ISO para el desarrollo de las pruebas

Para determinar la potencia, tanto la norma ISO 1585 como la SAE J1349 [69], [70] establecen una serie de parámetros que se deben medir: la velocidad (rpm), torque, temperatura del aire de entrada, presión atmosférica y la humedad relativa.

La Figura 7 muestra el diagrama de Ishikawa simplificado de las principales fuentes de incertidumbre asociadas a la medición de la potencia corregida de un motor de combustión interna en el dinamómetro SAENZ del Laboratorio de Motores del Departamento de Investigación de RECOPE [75]. La Figura 7 muestra las principales incertidumbres asociadas a la medición de potencia, dentro de ellas se encuentran las asociadas a las condiciones ambientales (α), la repetibilidad, la incertidumbre asociada a la medición de la velocidad angular (ω) y la incertidumbre asociada a la medición de torque (T).

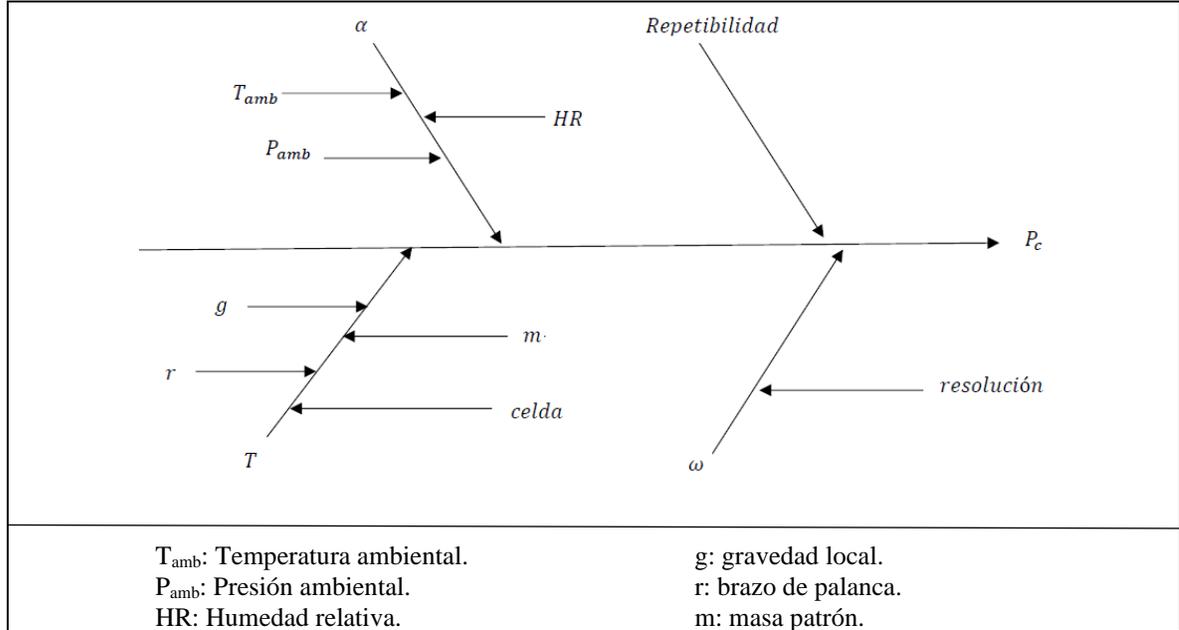


Figura 7. Diagrama de Ishikawa [75].

2.7 Análisis estadístico

Los resultados de las mediciones de consumo específico de combustible, potencia al freno y torque al freno fueron analizados mediante estadística descriptiva y un análisis de varianza utilizando la prueba de Tukey con un valor de probabilidad $p > 0,05$ para determinar si hay algún efecto al utilizar mezclas de biodiésel en cada una de las revoluciones, respecto al combustible diésel. Se utilizó el software para el análisis estadístico Infostat versión estudiantil 2019e.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades de las mezclas de biodiésel

Se realizó un análisis químico de las mezclas de biodiésel en el Laboratorio Químico del Departamento de Investigación de RECOPE.

Cuadro 3. Poder calorífico y viscosidad cinemática del diésel y mezclas de biodiésel.

Mezcla	Poder Calorífico MJ/kg	Viscosidad Cinemática mm ² /s
B5	-----	2,77
B10	44,96	2,80
B15	45,62	2,87
B20	44,73	2,95
B50	42,53	3,46
B100	39,90	4,94
ULSD	45,57	2,90

En el Cuadro 3 se muestra que al aumentar el porcentaje de biodiésel en las mezclas el poder calorífico disminuye. La mezcla B15 presenta un poder calorífico mayor en comparación a las demás mezclas. Se realizaron dos mediciones del poder calorífico para descartar un error de medición del equipo, sin embargo, en las dos mediciones se obtuvo el mismo resultado.

El comportamiento de una mezcla se evalúa por las prestaciones del motor mediante: la potencia, el torque, consumo de combustible y blowby [50]. Dichas variables se midieron a una velocidad del motor desde 1000 rpm hasta 4000 rpm, en incrementos de 500 rpm.

En el Cuadro 4 se muestra el factor de corrección obtenido para cada una de las pruebas realizadas con las diferentes mezclas de biodiésel. Se muestra que el coeficiente de variación (COV) es menor al 2%, lo cual indica que las condiciones ambientales se mantuvieron muy similares en cada uno de los ensayos realizados.

Cuadro 4. Factor de corrección según presión, humedad y temperatura ambiental.

RPM	Factor de corrección ISO 1585							
	ULSD	B5	B10	B15	B20	B50	B100	COV
1000	1,20	1,22	1,22	1,25	1,22	1,21	1,21	1,2%
1500	1,20	1,22	1,22	1,24	1,23	1,21	1,22	1,1%
2000	1,20	1,22	1,22	1,24	1,22	1,21	1,22	1,0%
2500	1,21	1,22	1,22	1,25	1,23	1,21	1,22	1,0%
3000	1,22	1,23	1,23	1,25	1,23	1,22	1,23	1,1%
3500	1,21	1,23	1,23	1,27	1,24	1,22	1,22	1,4%
4000	1,22	1,23	1,23	1,28	1,25	1,22	1,23	1,6%

COV: coeficiente de variación de las condiciones ambientales.

3.2 Consumo específico de combustible (BSFC)

El consumo específico de combustible disminuye al aumentar las revoluciones del motor hasta llegar a un valor mínimo, después de este punto el BSFC vuelve a aumentar debido al aumento de las pérdidas por fricción dentro del motor. A bajas revoluciones del motor el consumo es elevado debido a el mayor tiempo por ciclo que permite más pérdida de calor [76].

Las investigaciones [14], [31], [32] para la mezcla B5, concluyen que el consumo de combustible se incrementa entre un 2,17% y 5,0%. Contrario a las citas anteriores, en la Figura 8 se muestra una disminución promedio del BSFC de 18,5% para el ensayo realizado. Esta disminución según lo indican [23], [28], [37] se debe a que al utilizar bajos porcentajes de biodiésel (mezclas menores al 10%) aumenta el número de cetano en mezcla, unido a una baja densidad y viscosidad, mejorando el proceso de combustión, lo cual hace que el consumo de combustible sea menor. Al realizar el análisis estadístico (ver Cuadro 5) se observa que hay diferencias significativas en el consumo de combustible al utilizar B5 en todas las revoluciones. El consumo mínimo para la mezcla de biodiésel se obtiene a 2500 rpm, mientras que para el diésel a 3000 rpm.

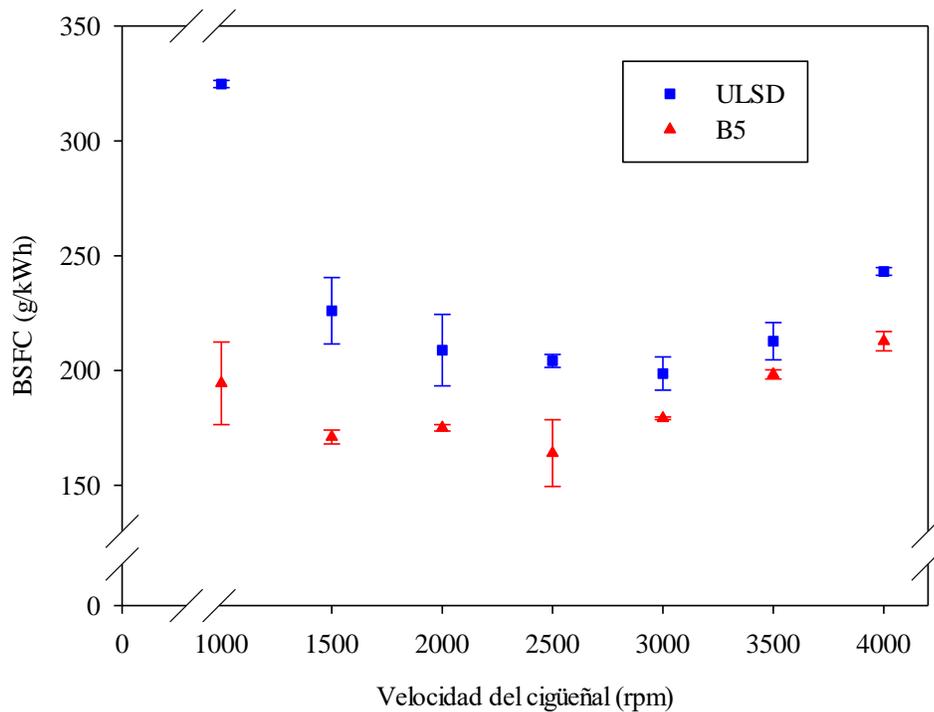


Figura 8. Consumo específico al freno versus giro del motor para B5.

Cuadro 5. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B5 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B5	
1000	324,76 ^A	194,42 ^B	0,0023
1500	226,06 ^A	171,03 ^B	0,0062
2000	208,89 ^A	175,02 ^B	0,0264
2500	204,16 ^A	164,01 ^B	0,035
3000	198,64 ^A	179,15 ^B	0,0147
3500	212,76 ^A	198,25 ^B	0,0497
4000	243,16 ^A	212,78 ^B	0,0026

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los estudios [10], [13], [14], [21], reportan para la mezcla B10 un incremento del BSFC entre 1,0% y 9,0%. Con los datos del ensayo en la Figura 9 se muestra un incremento promedio del BSFC de 3,5% en comparación al combustible diésel, sin embargo, el análisis estadístico del Cuadro 6, muestra que no hay diferencias significativas al utilizar B10

respecto al diésel. Según lo indica [34] este comportamiento se debe a la naturaleza oxigenada del biodiésel que mejora la combustión por lo cual el BSFC se mantiene en comparación al diésel.

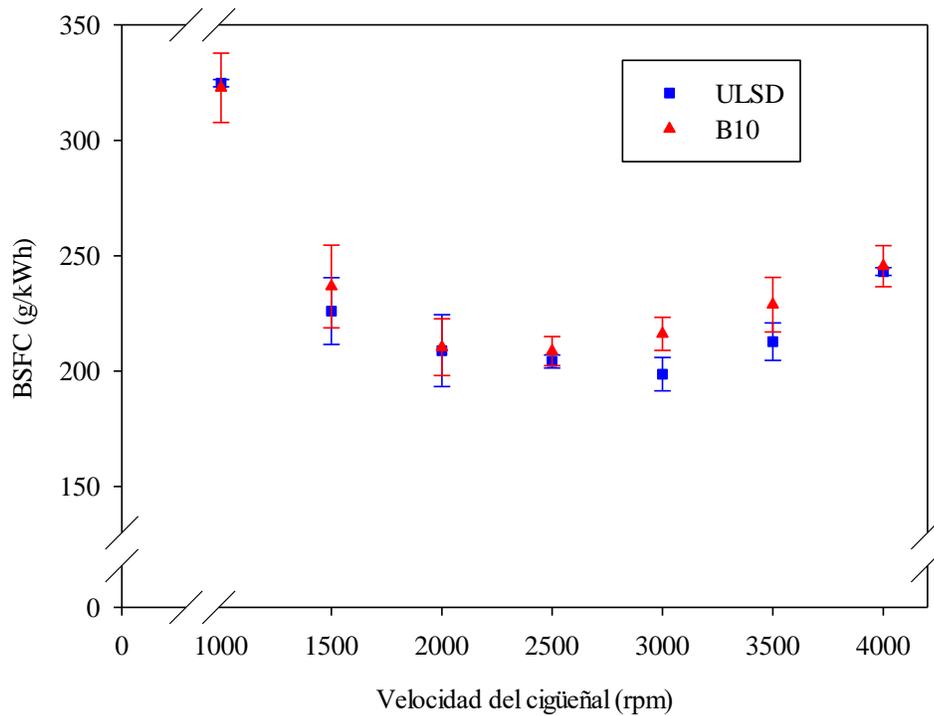


Figura 9. Consumo específico al freno versus giro del motor para B10.

Cuadro 6. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B10 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B10	
1000	324,76 ^A	322,76 ^A	0,8697
1500	226,06 ^A	236,70 ^A	0,5388
2000	208,89 ^A	210,36 ^A	0,9125
2500	204,16 ^A	208,68 ^A	0,4276
3000	198,64 ^A	216,16 ^A	0,0757
3500	212,76 ^A	228,85 ^A	0,1994
4000	243,16 ^A	245,49 ^A	0,7515

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Con los datos obtenidos para la mezcla B15, en la Figura 10 se muestra una disminución promedio del consumo de 24,9% en comparación al combustible diésel, Alloune *et al* [23], indican que esta disminución se debe a que el biodiésel mejora el contenido de oxígeno de la mezcla, permitiendo una combustión más eficiente, sumado a una baja viscosidad y densidad. El análisis estadístico del Cuadro 7 muestra que hay diferencias estadísticas ($p < 0,05$) al utilizar B15 respecto al ULSD en todas las revoluciones. Al utilizar B15 el consumo mínimo se obtiene a 2000 rpm el cual es de 151,8 g/kWh.

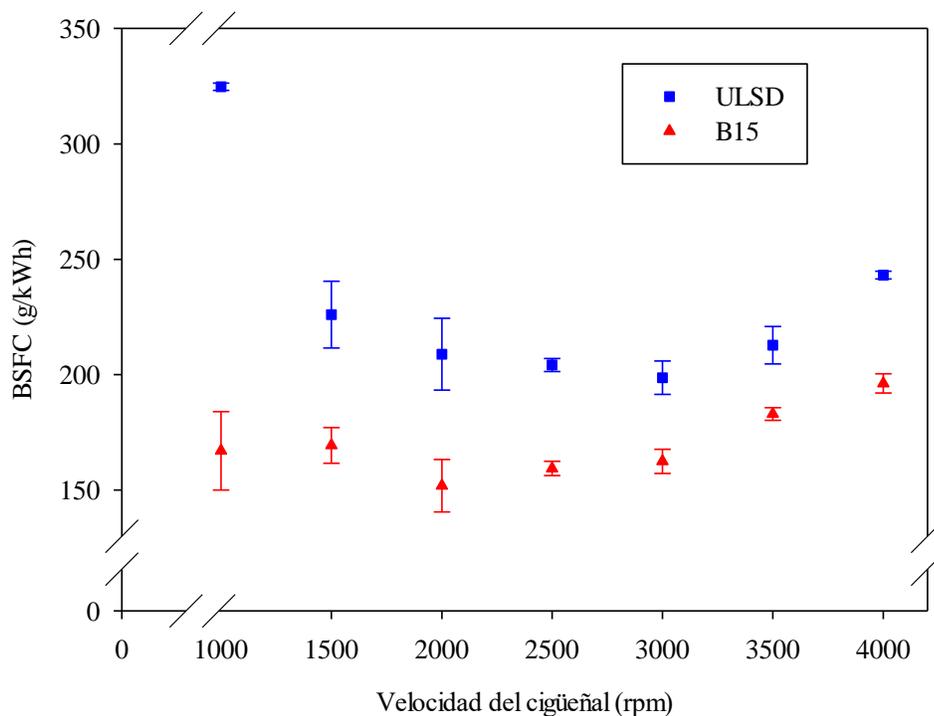


Figura 10. Consumo específico al freno versus giro del motor para B15.

Cuadro 7. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B15 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B15	
1000	324,76 ^A	166,97 ^B	0,0011
1500	226,06 ^A	169,32 ^B	0,0095
2000	208,89 ^A	151,83 ^B	0,0169
2500	204,16 ^A	159,33 ^B	0,0005
3000	198,64 ^A	162,41 ^B	0,007
3500	212,76 ^A	182,92 ^B	0,0081
4000	243,16 ^A	196,15 ^B	0,0007

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los estudios [10], [13], [14], [20], [21], [27]–[29], [31], indican que al utilizar B20, el consumo de combustible se incrementa entre el 2,1% al 26,4%. Contrario a las citas anteriores, con los datos del ensayo, en la Figura 11, se observa que el BSFC en promedio es 19,1% menor en comparación al diésel, como lo indican [23] y [34], la naturaleza oxigenada del biodiésel y un mayor número de cetano, ayuda a que la combustión sea más completa por ende el consumo de combustible es menor. El análisis estadístico (ver Cuadro 8) muestra que al comparar el BSFC de la mezcla B20 con el diésel hay diferencias significativas ($p < 0,05$) en el consumo de combustible en toda la gama revoluciones excepto a 3000 rpm. Al utilizar biodiésel a un 20% el consumo mínimo se obtiene a 2500 rpm y es de 165,9 g/kWh.

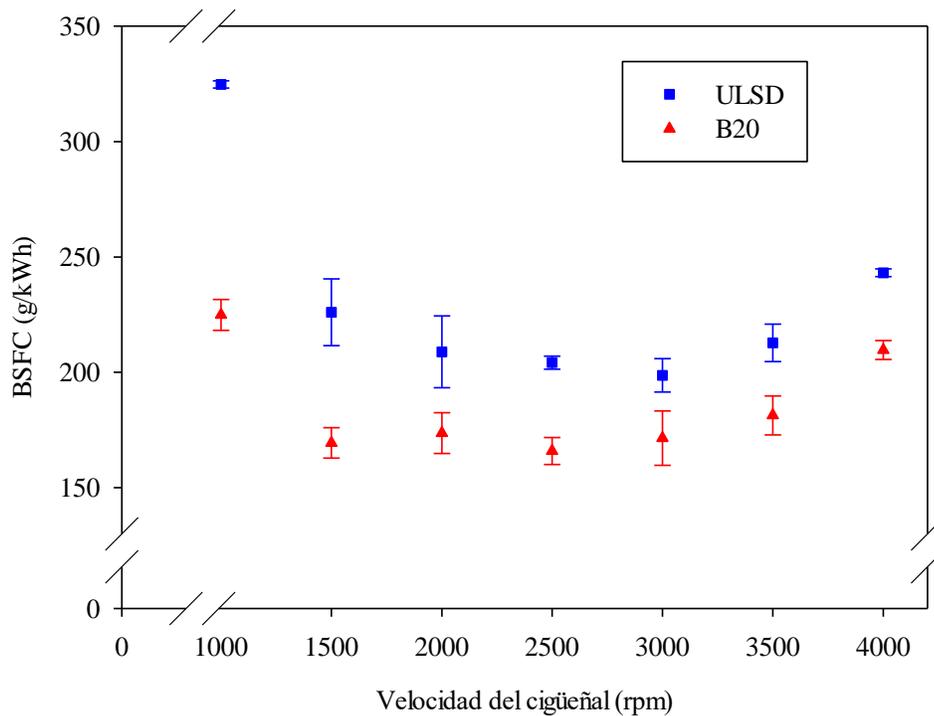


Figura 11. Consumo específico al freno versus giro del motor para B20.

Cuadro 8. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B20 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B20	
1000	324,76 ^A	224,89 ^B	0,0003
1500	226,06 ^A	169,38 ^B	0,0082
2000	208,89 ^A	173,63 ^B	0,044
2500	204,16 ^A	165,87 ^B	0,0037
3000	198,64 ^A	171,44 ^A	0,0656
3500	212,76 ^A	181,28 ^B	0,0257
4000	243,16 ^A	209,69 ^B	0,0019

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Según [10], [31], [34], para la mezcla B50 se tiene un incremento promedio del BSFC entre 3,5% y 9,4%. En la Figura 12 se muestra los resultados del consumo de combustible al utilizar B50, al comparar los resultados obtenidos del BSFC del B50, se puede observar que estos

son inferiores al diésel en todas las revoluciones. El análisis estadístico mostrado en el Cuadro 9 indica que no hay diferencias significativas en 1000 rpm y 3500 rpm, en las demás revoluciones si se evidencias que hay diferencias significativas. El consumo mínimo para esta mezcla se obtiene a 2000 rpm.

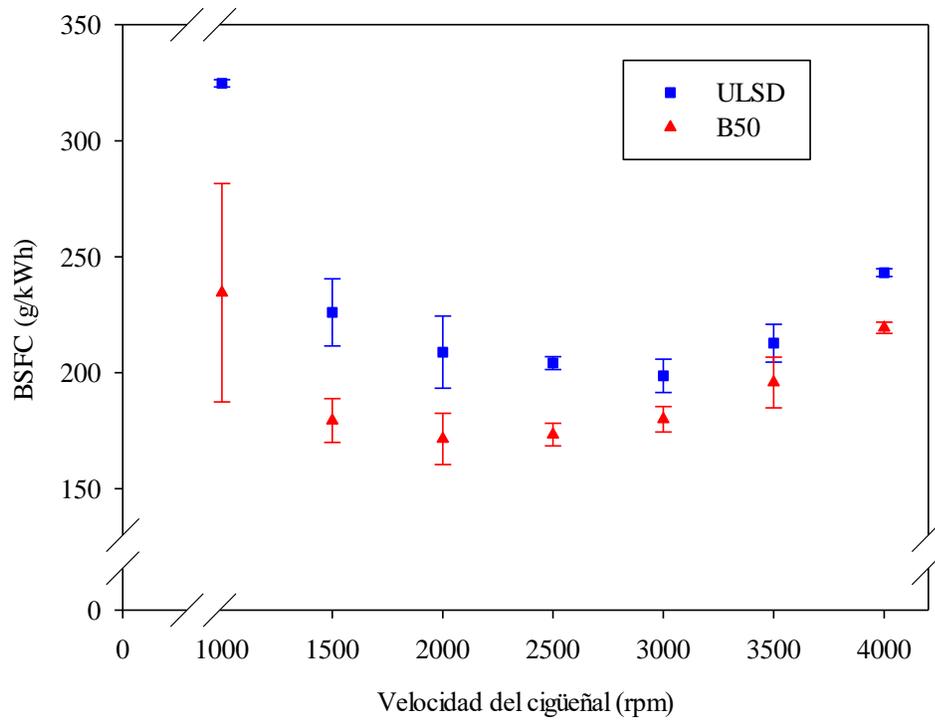


Figura 12. Consumo específico al freno versus giro del motor para B50.

Cuadro 9. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B50 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B50	
1000	324,76 ^A	234,49 ^A	0,0826
1500	226,06 ^A	179,34 ^B	0,0204
2000	208,89 ^A	171,42 ^B	0,0486
2500	204,16 ^A	173,28 ^B	0,0043
3000	198,64 ^A	179,91 ^B	0,0441
3500	212,76 ^A	195,78 ^A	0,1638
4000	243,16 ^A	219,41 ^B	0,0053

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Las investigaciones [10], [17]–[20], [31], [34], indican que el BSFC incrementa entre 2,0% y 16,7%, para el biodiésel puro. En la Figura 13, se muestra el comportamiento del BSFC al utilizar B100, al compararla con las mezclas B5, B15, B20 y B50, presenta el mayor consumo de combustible. Según [23], este comportamiento es a causa de que el biodiésel puro tiene menor poder calorífico en comparación con las mezclas y una mayor viscosidad, lo cual se puede observar en el Cuadro 3. El consumo mínimo se obtiene a 2500 rpm y es de 173,86 g/kWh.

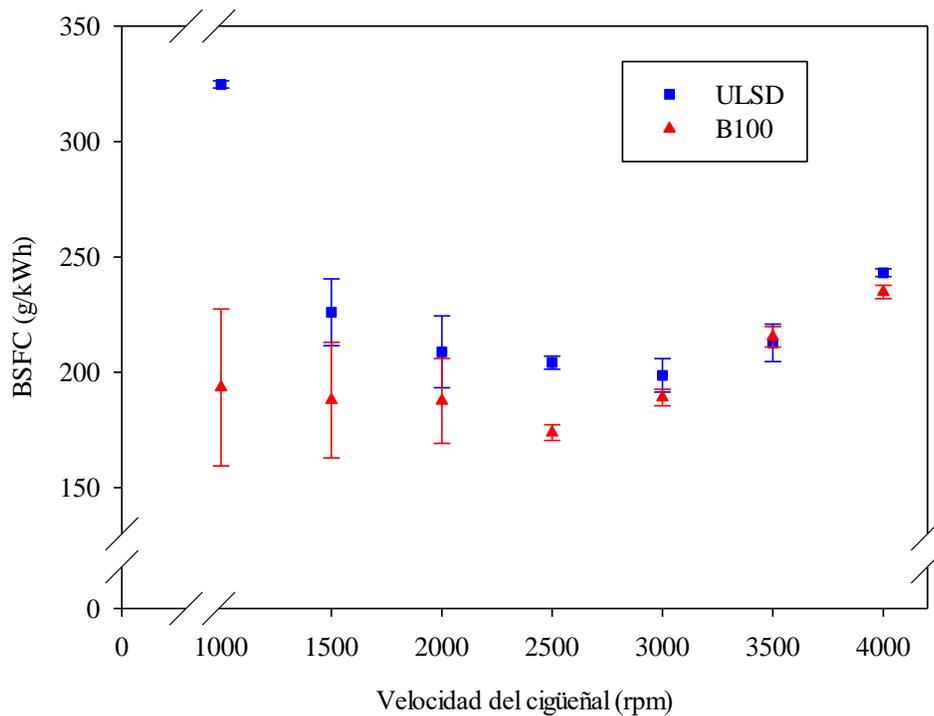


Figura 13. Consumo específico al freno versus giro del motor para B100.

Cuadro 10. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del BSFC para B100 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	BSFC (g/kWh)		<i>p</i>
	ULSD	B100	
1000	324,76 ^A	193,42 ^B	0,0141
1500	226,06 ^A	187,94 ^A	0,1553
2000	208,89 ^A	187,57 ^A	0,2749
2500	204,16 ^A	173,86 ^B	0,0021
3000	198,64 ^A	189,04 ^A	0,1315
3500	212,76 ^A	215,42 ^A	0,6558
4000	243,16 ^A	234,81 ^B	0,0371

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

En las mezclas B5, B15, B20; B50, B100 el consumo promedio de combustible es menor en comparación al diésel. Al utilizar biodiésel en un 15% en mezcla, se obtiene el menor consumo mínimo de combustible. El biodiésel puro obtuvo el mayor BSFC en comparación a las mezclas B5, B15, B20 y B50, Abedin *et al* [14] indican que este comportamiento es a

causa de que al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla disminuye el poder calorífico, aumenta la densidad y viscosidad afectando el proceso de pulverización del combustible provocando una combustión ineficiente y un mayor consumo.

La disminución del consumo de combustible al utilizar las mezclas se debe al porcentaje de oxígeno que el biodiésel aporta, lo cual ayuda a mejorar la combustión [23]. Del ensayo realizado, la mezcla que presenta el menor consumo de combustible es la B15 con un 24,9% más bajo que el diésel, este comportamiento pudo haber sido debido a que la mezcla presenta un mayor poder calorífico en comparación a las demás mezclas como se muestra en Cuadro 3.

3.3 Potencia al freno

La potencia aumenta al aumentar las revoluciones del motor hasta un valor máximo, a partir de este punto aunque se aumente la velocidad del motor, este no puede entregar más potencia debido a un aumento en las pérdidas por fricción [76].

Según [15], [16], [26], la potencia aumenta al incrementar las revoluciones del motor, para un B5 reportan una disminución promedio de la potencia entre 1,2% y 6%. Con los datos obtenidos, en la Figura 14 se observa que la potencia se mantiene hasta las 2500 rpm. El análisis estadístico (prueba de Tukey) mostrado en el Cuadro 11, demostró que hay diferencias significativas ($p < 0,05$) en la potencia al utilizar B5 respecto al ULSD a partir de las 3000 rpm; entre las 3000 rpm y 4000 rpm la potencia disminuye un 4,5% respecto al diésel. Esta disminución se debe al bajo poder calórico de la mezcla en comparación al diésel [16].

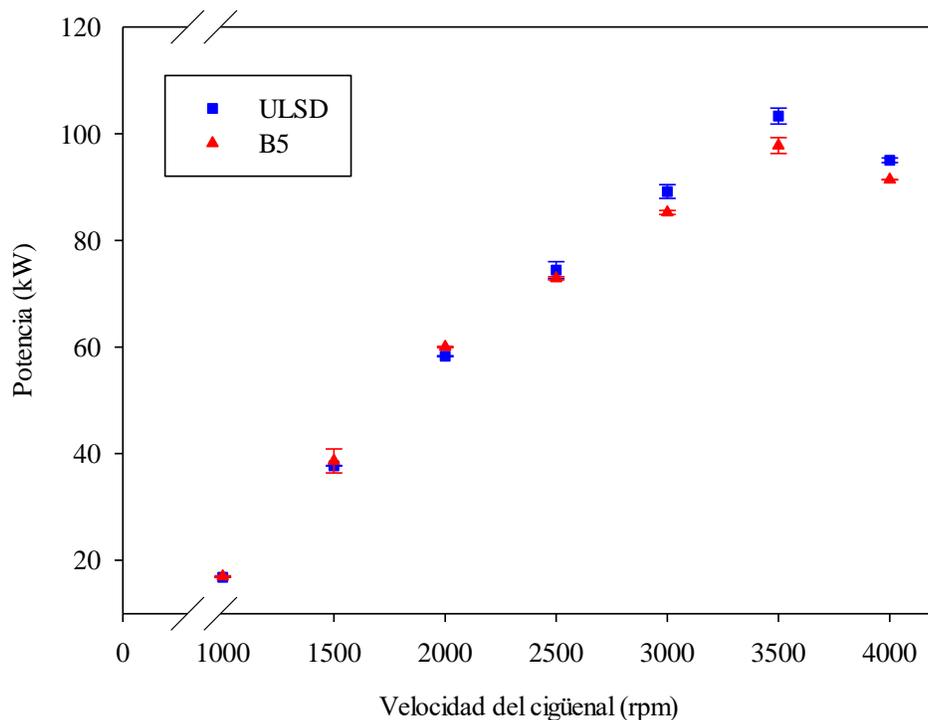


Figura 14. Potencia al freno versus giro del motor para B5.

Cuadro 11. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B5 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		<i>p</i>
	ULSD	B5	
1000	16,82 ^A	16,97 ^A	0,2332
1500	37,72 ^A	38,63 ^A	0,6258
2000	58,29 ^A	60,02 ^B	0,0004
2500	74,43 ^A	72,91 ^A	0,1718
3000	89,16 ^A	85,24 ^B	0,0126
3500	103,32 ^A	97,78 ^B	0,0269
4000	95,03 ^A	91,39 ^B	0,0005

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los estudios [13]–[15], [26], [27], prueban que para B10, hay una disminución promedio de la potencia entre 0,5% y 11,64%. De acuerdo con los resultados obtenidos, en la Figura 15 se muestra que la potencia se mantiene hasta las 2500 rpm. El análisis estadístico (prueba de

Tukey) mostrado en el Cuadro 12 indica que hay diferencias significativas a partir de las 3000 rpm respecto al diésel, a estas misma revoluciones como se muestra en la Figura 15 la potencia disminuye en un 5,1%. Según lo indica [16], esta disminución se debe al menor poder energético del biodiésel, al comparar el poder calorífico de la mezcla B10 con el diésel en el Cuadro 3, se observa que es un 1,3% menor.

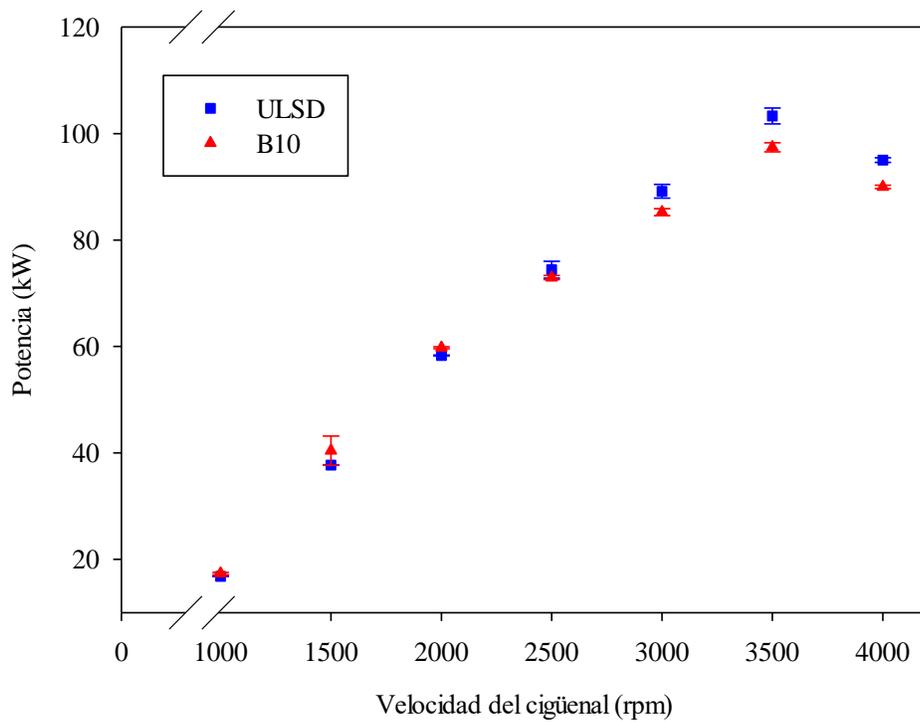


Figura 15. Potencia al freno versus giro del motor para B10.

Cuadro 12. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B10 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		p
	ULSD	B10	
1000	16,82 ^A	17,34 ^A	0,0503
1500	37,72 ^A	40,42 ^A	0,2798
2000	58,29 ^A	59,76 ^B	0,0024
2500	74,43 ^A	72,96 ^A	0,1926
3000	89,16 ^A	85,24 ^B	0,0185
3500	103,32 ^A	97,43 ^B	0,0102
4000	95,03 ^A	89,99 ^B	0,0006

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

De los resultados obtenidos del ensayo para la mezcla B15, en la Figura 16 se observa, que la potencia se mantiene hasta las 3500 rpm. El análisis estadístico (ver Cuadro 13) indica que hay diferencias significativas únicamente a 4000 rpm, la potencia en este punto es un 3,3% menor para la mezcla de biodiésel en comparación al diésel.

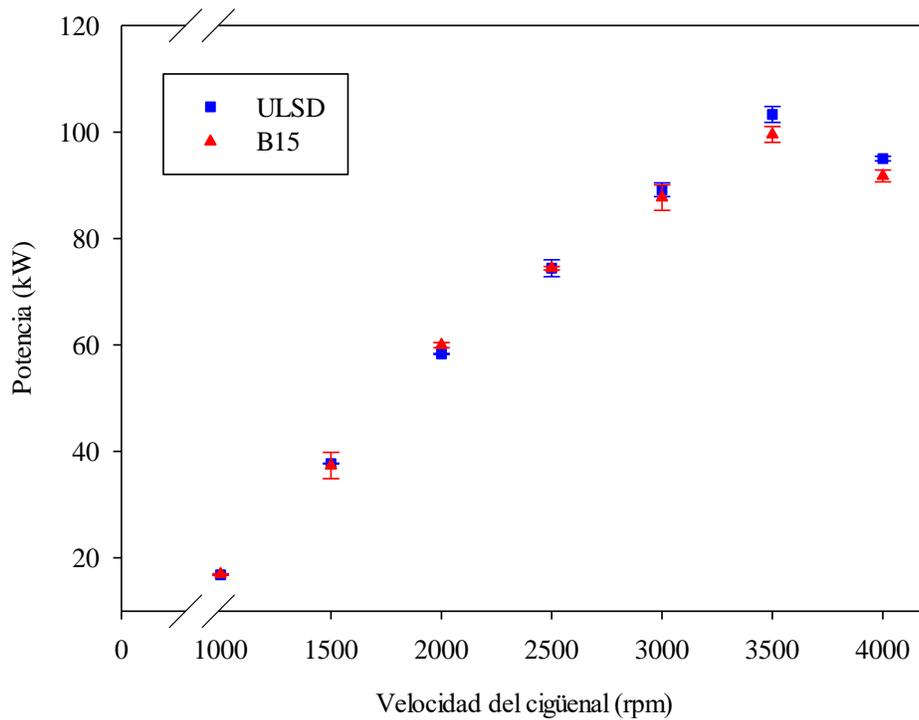


Figura 16. Potencia al freno versus giro del motor para B15.

Cuadro 13. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B15 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		<i>p</i>
	ULSD	B15	
1000	16,82 ^A	16,93 ^A	0,2504
1500	37,72 ^A	37,34 ^A	0,8495
2000	58,29 ^A	59,96 ^B	0,0214
2500	74,43 ^A	74,43 ^A	0,9986
3000	89,16 ^A	87,7 ^A	0,4998
3500	103,32 ^A	99,56 ^A	0,0689
4000	95,03 ^A	91,75 ^B	0,0318

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Las investigaciones [13], [14], [25], [28]–[31], [33] reportan para la mezcla de biodiésel al 20% una disminución de la potencia promedio entre 1,2% y 16,69%. Se realizó un análisis estadístico mediante la prueba de Tukey (ver Cuadro 14), la cual demostró que hay

diferencias significativas a 3500 rpm y 4000 rpm. En la Figura 17 se muestra que la potencia disminuye a partir de 3500 rpm en un 3,8% respecto al diésel, esto se debe al menor poder energético por unidad de volumen según [27], así como se observa en el Cuadro 3 el poder calórico de la mezcla B20 es 1,8% menor en comparación al diésel.

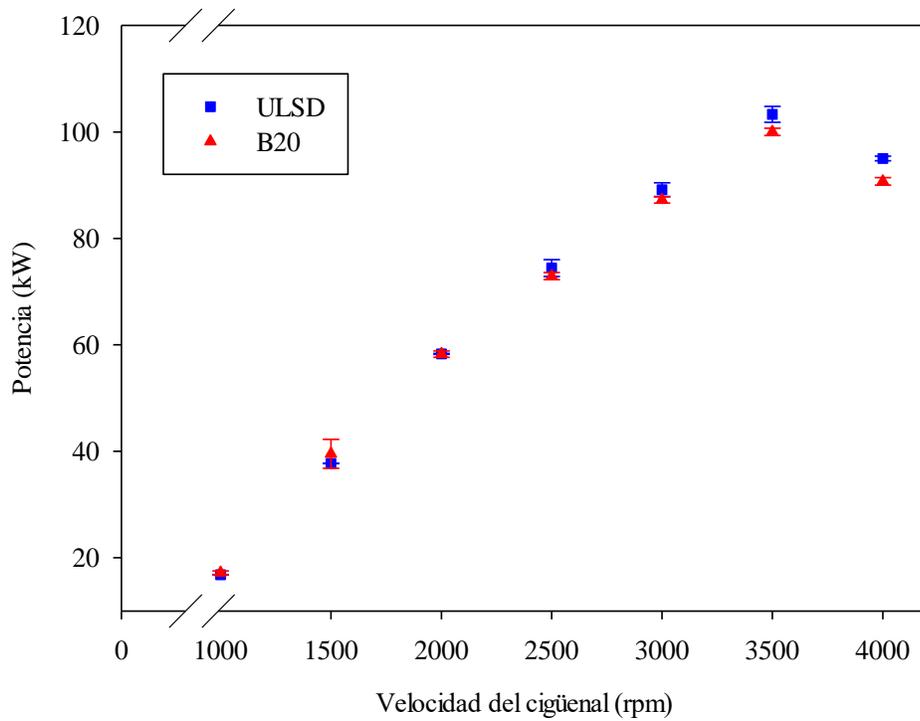


Figura 17. Potencia al freno versus giro del motor para B20.

Cuadro 14. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B20 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		p
	ULSD	B20	
1000	16,82 ^A	17,20 ^A	0,1036
1500	37,72 ^A	39,52 ^A	0,4397
2000	58,29 ^A	58,25 ^A	0,9425
2500	74,43 ^A	72,93 ^A	0,2159
3000	89,16 ^A	87,23 ^A	0,0966
3500	103,32 ^A	100,02 ^B	0,0385
4000	95,03 ^A	90,72 ^B	0,0047

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Con los datos del ensayo, para la mezcla de un 50% de biodiésel con diésel convencional, en la Figura 18 se muestra el resultado obtenido de potencia para la mezcla B50, de acuerdo al análisis estadístico del Cuadro 15 hay diferencias significativas en 1500 rpm, 3000 rpm y 4000 rpm, en estas revoluciones la potencia es menor para la mezcla en comparación al diésel; en las demás revoluciones no hay diferencias significativas, lo cual indica que la potencia se mantiene.

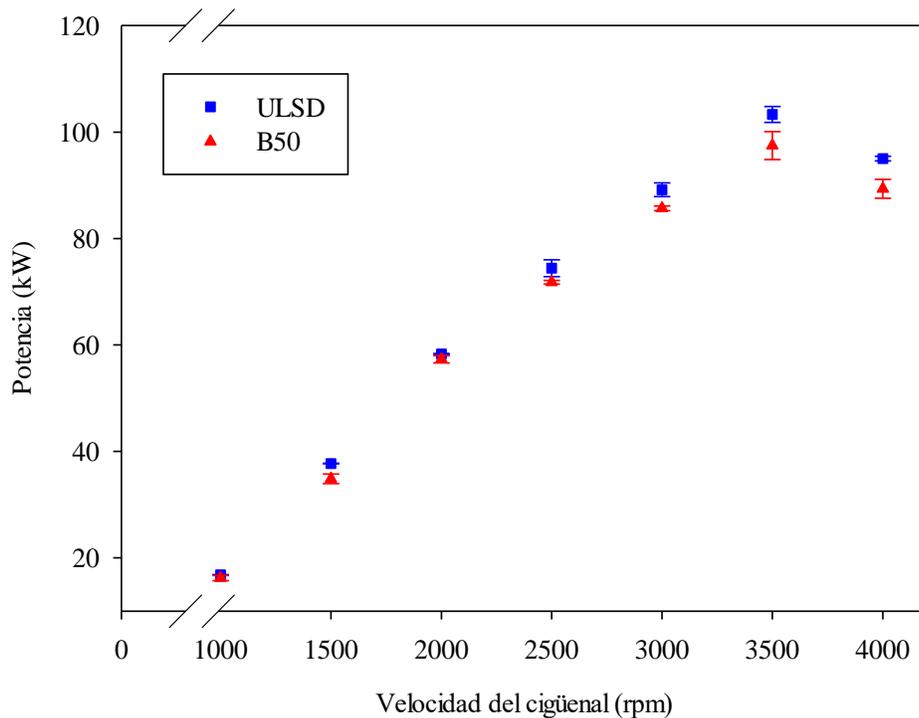


Figura 18. Potencia al freno versus giro del motor para B50.

Cuadro 15. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B50 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		<i>p</i>
	ULSD	B50	
1000	16,82 ^A	16,21 ^A	0,1806
1500	37,72 ^A	34,86 ^B	0,0238
2000	58,29 ^A	57,30 ^A	0,1403
2500	74,43 ^A	71,80 ^A	0,0564
3000	89,16 ^A	85,67 ^B	0,019
3500	103,32 ^A	97,46 ^A	0,0681
4000	95,03 ^A	89,33 ^B	0,0483

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Según [18] al utilizar biodiésel puro la potencia disminuye en un 16%. De acuerdo con el experimento, en la Figura 19 se observa una disminución promedio de 11,8% en la potencia para todo el régimen de revoluciones. El análisis estadístico (prueba de Tukey) mostrado en

el Cuadro 16, demostró que hay diferencias significativas al utilizar biodiésel puro en todas las revoluciones en comparación al ULSD. Esta disminución en la potencia se debe al bajo poder calorífico y elevada viscosidad que tiene el biodiésel [31].

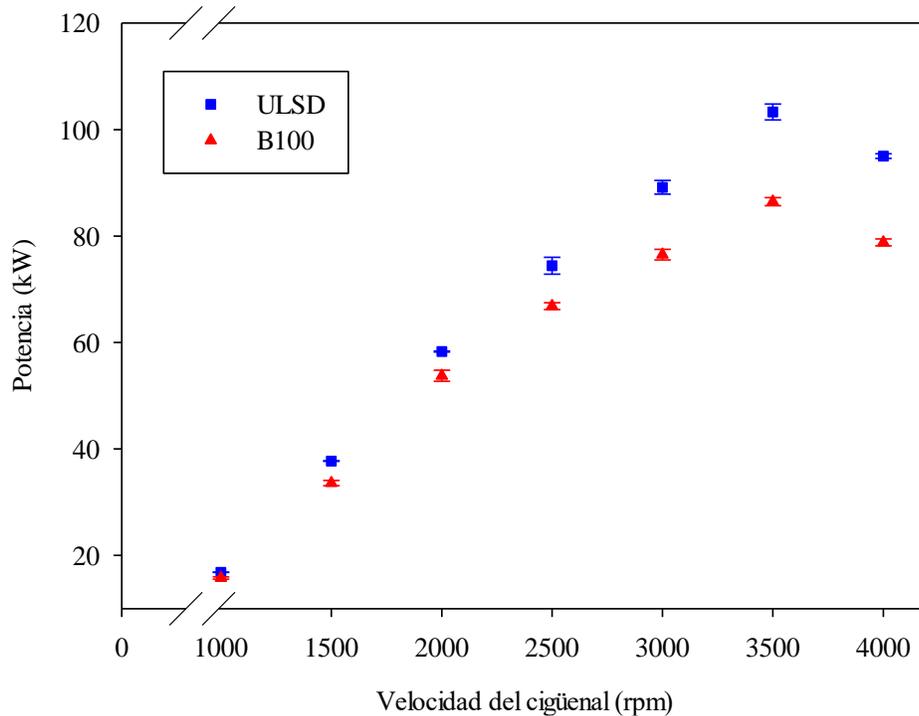


Figura 19. Potencia al freno versus giro del motor para B100.

Cuadro 16. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey de la potencia al freno para B100 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Potencia (kW)		<i>p</i>
	ULSD	B100	
1000	16,82 ^A	15,76 ^B	0,0058
1500	37,72 ^A	33,59 ^B	0,0016
2000	58,29 ^A	53,74 ^B	0,0097
2500	74,43 ^A	66,85 ^B	0,0042
3000	89,16 ^A	76,53 ^B	0,0011
3500	103,32 ^A	86,47 ^B	0,0004
4000	95,03 ^A	78,82 ^B	0,0001

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Al utilizar mezclas menores al 20% la potencia disminuye a partir de las 3000 rpm, la mezcla B100 presentan las mayores disminuciones de potencia debido a que es la que tiene el poder calorífico más bajo y una mayor viscosidad (ver Cuadro 3), lo cual concuerda con [24], [31], que indican que al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla, la potencia disminuye debido a una disminución del poder calorífico, a un aumento en la densidad y viscosidad que provoca una pobre pulverización del combustible.

3.4 Torque al freno

El torque es un buen indicador de la capacidad que tiene el motor para realizar trabajo, aumenta al incrementar las revoluciones del motor hasta un punto máximo, después de este punto al aumentar las revoluciones el torque empieza a decaer, debido a que el llenado de los cilindros no es completo y las pérdidas por fricción dentro del motor son mayores [76]. Los motores diésel están diseñados para generar un alto torque a bajas revoluciones [41].

Según [15], [26], [31] para la mezcla B5, reportan una disminución promedio del torque entre el 2,01% y 12,5 %. En la Figura 20 se observan los valores obtenidos de torque para el combustible diésel y la mezcla B5, ambos combustibles se comportan de manera similar en toda la gama de revoluciones, sin embargo, el torque máximo para el biodiésel se obtiene a 2000 rpm (286,8 Nm) mientras que para el diésel se obtiene a 2500 rpm (285,2 Nm). El análisis estadístico del Cuadro 17, muestra que no hay diferencias significativas en el torque en 1000 rpm y 1500 rpm, lo que indica que el torque se mantiene a estas revoluciones en comparación al combustible diésel, a partir de las 3000 rpm hay diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos combustibles, observándose que hay una disminución del torque para la mezcla B5 de 4,9%. Esta disminución se debe principalmente al bajo poder calórico del biodiésel [26].

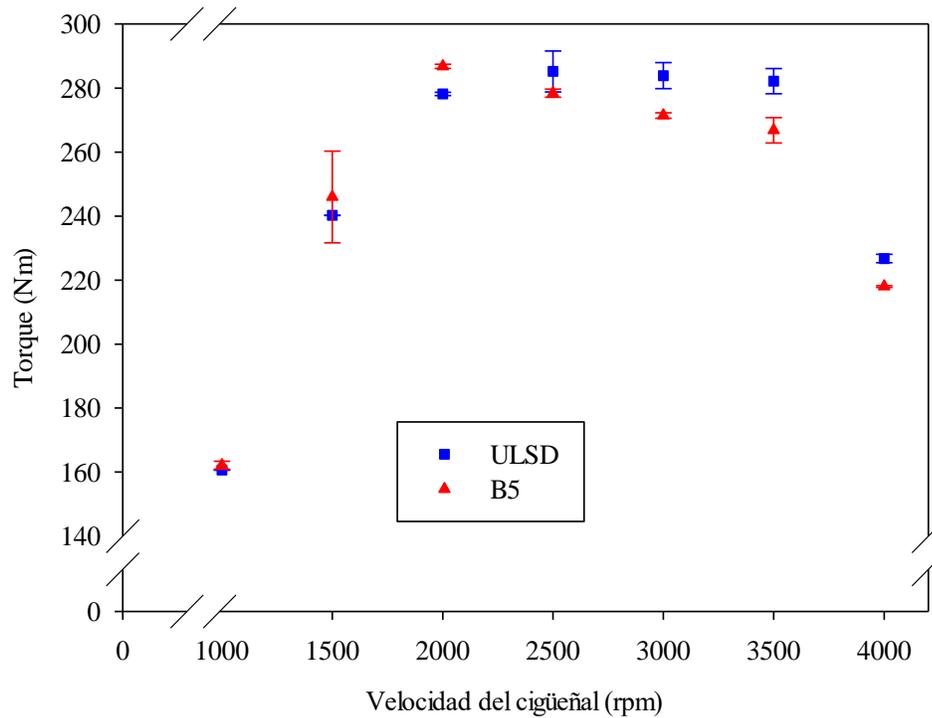


Figura 20. Torque al freno versus giro del motor para B5.

Cuadro 17. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B5 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		<i>p</i>
	ULSD	B5	
1000	160,63 ^A	162,14 ^A	0,1983
1500	240,23 ^A	245,98 ^A	0,6276
2000	278,19 ^A	286,79 ^B	0,0006
2500	285,20 ^A	278,38 ^A	0,1458
3000	283,87 ^A	271,41 ^B	0,0114
3500	282,16 ^A	266,82 ^B	0,0238
4000	226,75 ^A	218,02 ^B	0,0013

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los estudios [10], [26] concluyen que para la mezcla B10 el torque disminuye entre el 11,6% y 12,5%. En la Figura 21 se muestra los valores obtenidos del torque al utilizar B10, se observa que el torque se mantiene hasta las 1500 rpm respecto al ULSD (no hay diferencias

significativas $p > 0,05$, ver Cuadro 18), el torque máximo para la mezcla es de 285,4 Nm a 2000 rpm, mientras que el torque máximo para el diésel es de 285,2 Nm a 2500 rpm. El análisis estadístico (ver Cuadro 18) indica que hay diferencias significativas ($p < 0,05$) al utilizar B10 respecto al diésel a partir de 3000 rpm, mostrándose una disminución del torque para la mezcla de 5,1%.

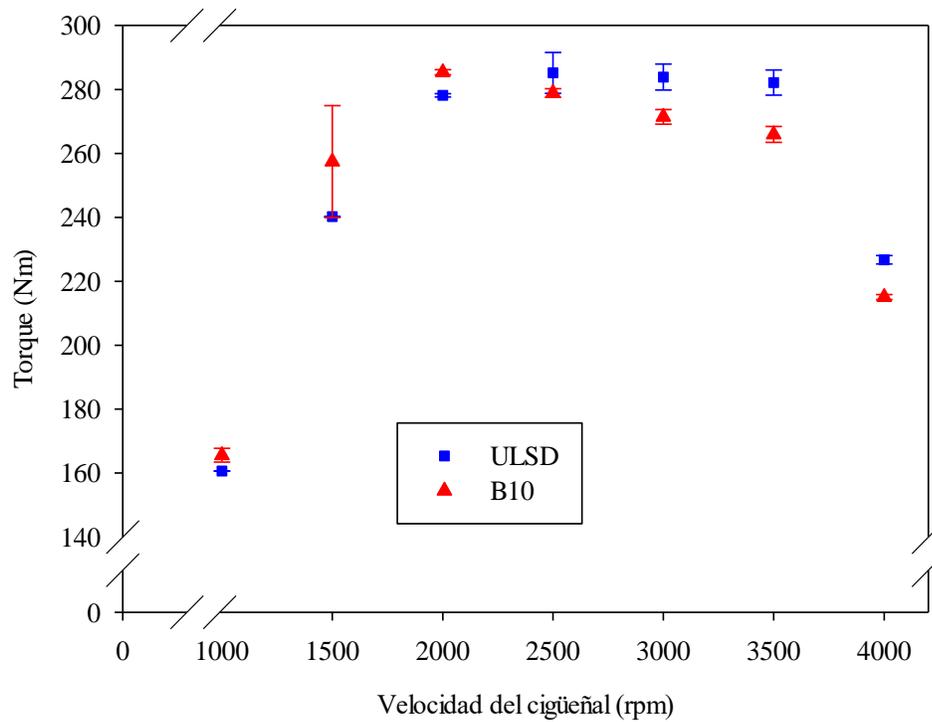


Figura 21. Torque al freno versus giro del motor para B10.

Cuadro 18. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B10 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		p
	ULSD	B10	
1000	160,63 ^A	165,58 ^A	0,0532
1500	240,23 ^A	257,44 ^A	0,2788
2000	278,19 ^A	285,38 ^B	0,0016
2500	285,20 ^A	278,91 ^A	0,1711
3000	283,87 ^A	271,43 ^B	0,0198
3500	282,16 ^A	265,94 ^B	0,0099
4000	226,75 ^A	215,07 ^B	0,0010

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Para la mezcla de biodiésel al 15%, en la Figura 22 se observa que el torque se mantiene hasta las 3000 rpm en comparación al combustible diésel, obteniendo un torque máximo a 2000 rpm de 286,43 Nm el cual es un 3% mayor al diésel. El Cuadro 19, muestra que hay diferencias significativas al utilizar B15 en 2000 rpm y en 4000 rpm, la disminución del torque a 4000 rpm es de 3,3%.

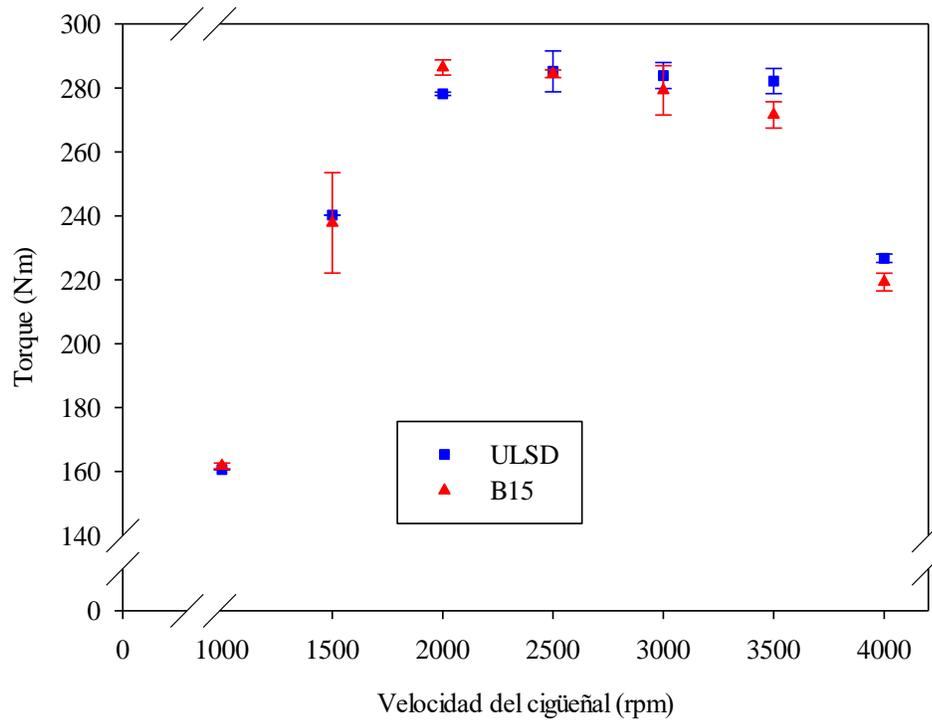


Figura 22. Torque al freno versus giro del motor para B15.

Cuadro 19. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B15 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		<i>p</i>
	ULSD	B15	
1000	160,63 ^A	161,77 ^A	0,1937
1500	240,23 ^A	237,82 ^A	0,8497
2000	278,19 ^A	286,41 ^B	0,0193
2500	285,20 ^A	284,43 ^A	0,8383
3000	283,87 ^A	279,25 ^A	0,5064
3500	282,16 ^A	271,58 ^A	0,0648
4000	226,75 ^A	219,32 ^B	0,042

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Las investigaciones [10], [31], [34] indican que para la mezcla B20 el torque disminuye entre 1,90% y 4,28%. En la Figura 23 se observa que el torque se mantiene hasta las 3000 rpm, el

análisis estadístico del Cuadro 20 muestra que hay diferencias estadísticas a 3500 rpm y 4000 rpm, evidenciándose una disminución de 3,8% en el torque.

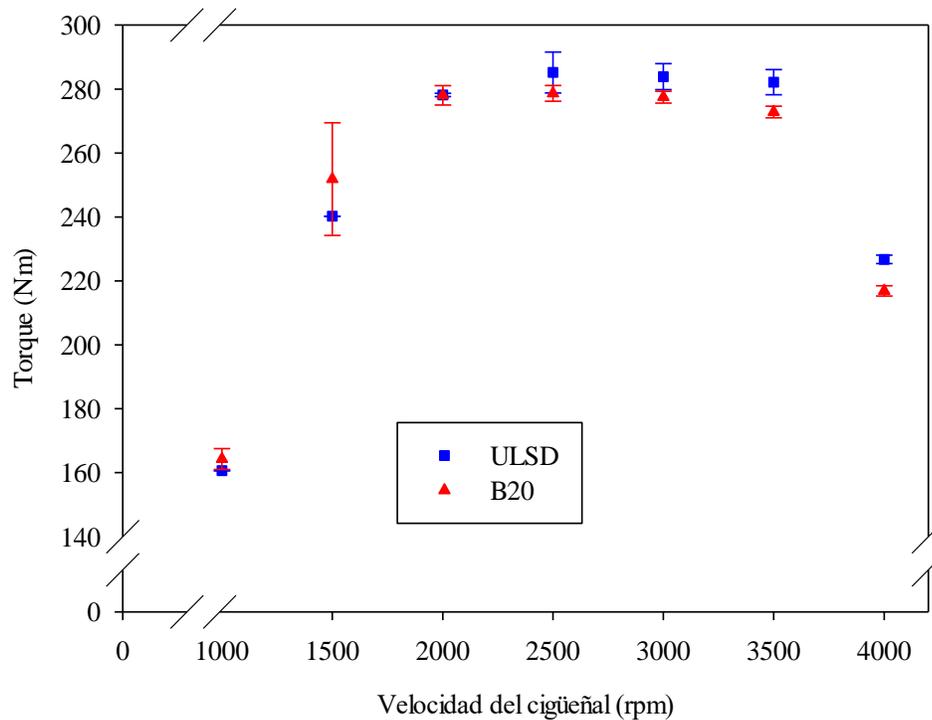


Figura 23. Torque al freno versus giro del motor para B20.

Cuadro 20. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B20 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		<i>p</i>
	ULSD	B20	
1000	160,63 ^A	164,26 ^A	0,2316
1500	240,23 ^A	251,85 ^A	0,4410
2000	278,19 ^A	278,04 ^A	0,9496
2500	285,20 ^A	278,64 ^A	0,1850
3000	283,87 ^A	277,47 ^A	0,0865
3500	282,16 ^A	272,85 ^B	0,0329
4000	226,75 ^A	216,9 ^B	0,0056

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Según [10], [31], [34] al utilizar B50 hay una disminución promedio del torque entre 3% y 5,16%. En la Figura 24 se muestra los valores obtenidos del torque para la mezcla de biodiésel al 50% cómo se puede observar los valores obtenidos para dicha mezcla en promedio son inferiores en comparación al diésel. El análisis estadístico (ver Cuadro 21) indica que hay diferencias significativas al utilizar biodiesel al 50% en 1500 rpm, 3000 rpm y 4000 rpm, para las demás revoluciones del motor no hay diferencias estadísticas significativas.

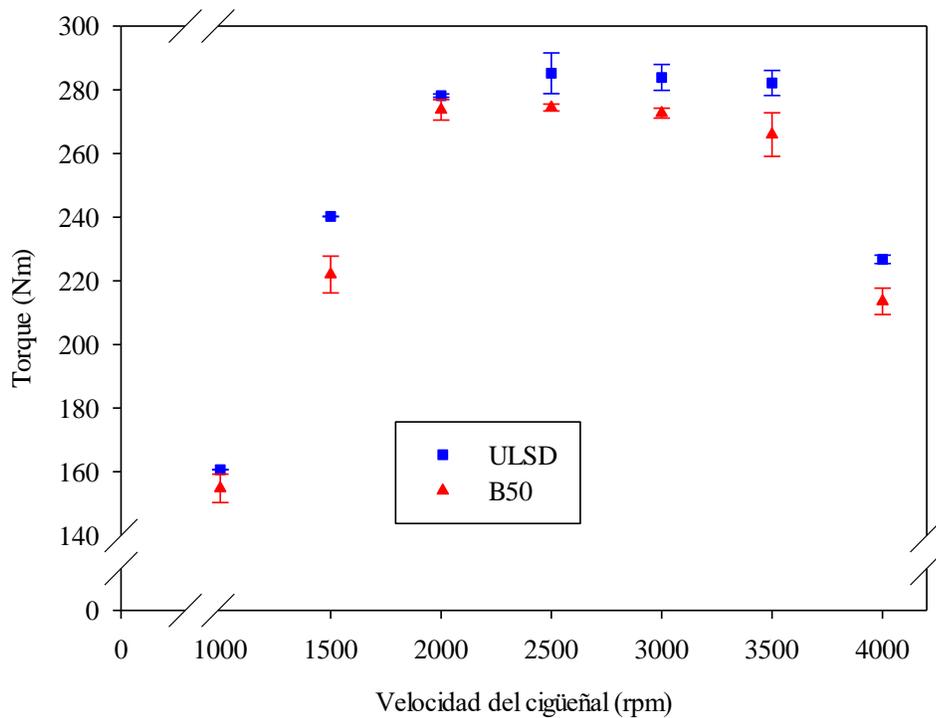


Figura 24. Torque al freno versus giro del motor para B50.

Cuadro 21. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B50 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		p
	ULSD	B50	
1000	160,63 ^A	154,79 ^A	0,1778
1500	240,23 ^A	222,01 ^B	0,0241
2000	278,19 ^A	273,7 ^A	0,1584
2500	285,20 ^A	274,45 ^A	0,0534
3000	283,87 ^A	272,68 ^B	0,0192
3500	282,16 ^A	265,94 ^A	0,0603
4000	226,75 ^A	213,58 ^B	0,0251

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Al utilizar biodiésel puro el torque disminuye entre 4,7% y 12,2% [10], [19], [31], [33], [34]. En la Figura 25 se observa que el torque disminuye en todas las revoluciones, en promedio es un 11,8% más bajo que el diésel convencional. El análisis estadístico (prueba de Tukey) mostrado en el Cuadro 22, demostró que hay diferencias significativas al utilizar biodiésel puro en comparación al ULSD en todas las revoluciones. Según [10], la disminución en la potencia se debe al bajo poder calorífico del biodiésel y la elevada viscosidad, como se muestra en el Cuadro 3, el poder calorífico del biodiésel es un 12,4% más bajo en comparación al diésel, y la viscosidad es un 41,2% mayor.

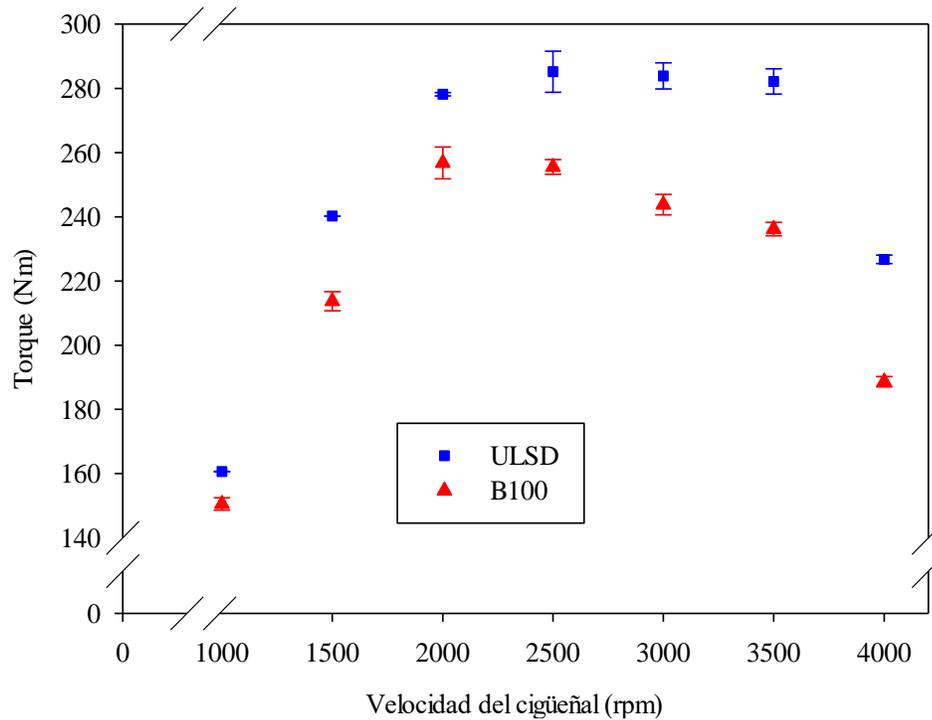


Figura 25. Torque al freno versus giro del motor para B100.

Cuadro 22. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey del torque al freno para B100 en comparación al diésel.

Velocidad del cigüeñal (rpm)	Torque (Nm)		<i>p</i>
	ULSD	B100	
1000	160,63 ^A	150,53 ^B	0,0059
1500	240,23 ^A	213,72 ^B	0,0013
2000	278,19 ^A	256,79 ^B	0,0102
2500	285,20 ^A	255,53 ^B	0,0043
3000	283,87 ^A	243,78 ^B	0,0011
3500	282,16 ^A	236,20 ^B	0,0004
4000	226,75 ^A	188,61 ^B	0,0001

Nota: Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Al utilizar mezclas menores al 20%, el torque disminuye a partir de las 3000 rpm. Las mezclas B50 y B100 presentan una mayor disminución del torque, este comportamiento se

debe a que al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla, disminuye el poder calorífico y aumenta la viscosidad, provocando una disminución en el torque [31].

3.5 Flujo de gases a través de los cilindros (Blowby)

El blowby es un parámetro que se utiliza para medir la cantidad de gases que pasan del cilindro a través de los pistones al cárter, este parámetro está relacionado con el desgaste del motor.

La Figura 26 muestra los valores obtenidos del blowby para las distintas mezclas de biodiésel. Para todas las mezclas, el blowby es menor en comparación al diésel, lo cual indica que menos gases de combustión pasan a través del cilindro hacia el depósito de aceite del motor, esto hace que haya una mayor presión dentro del cilindro, que ayuda a mejorar la combustión y por ello el consumo de combustible es más bajo en comparación al combustible diésel. Mitchell *et al* [77], indican que al pasar menos gases de escape a través de los cilindros, hay menos pérdidas por fricción y por ende menor disminución en la potencia, lo cual explica que la caída de torque y potencia obtenidos sean menores a lo reportado en la literatura.

El análisis estadístico del Cuadro 23 evidencia que no hay diferencias estadísticas significativas al utilizar las mezclas B20 y B100 respecto al ULSD, para las demás mezclas si se muestra que hay diferencias significativas.

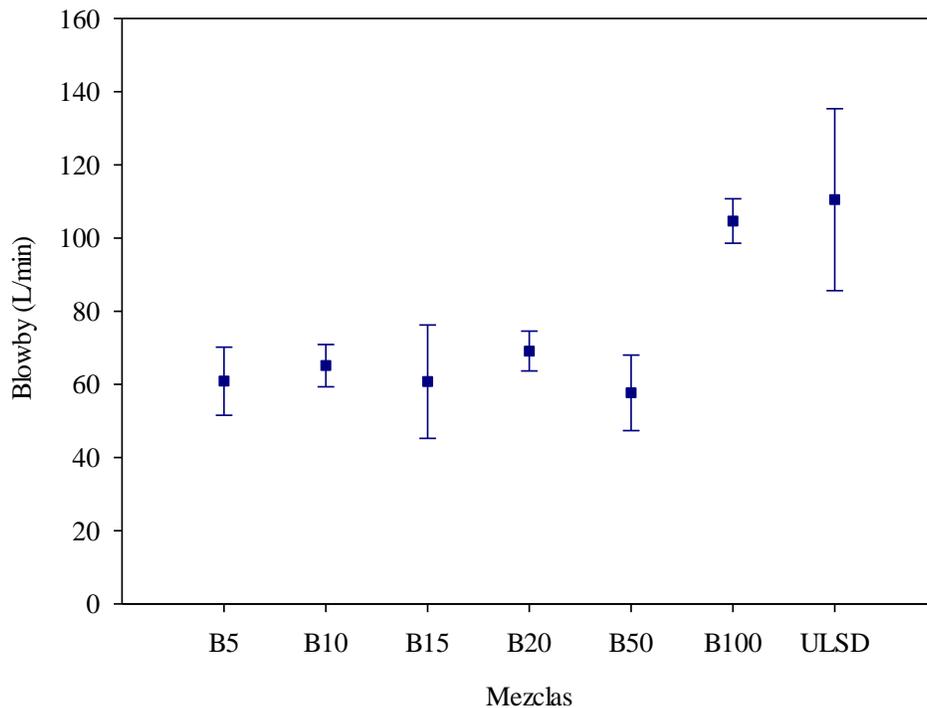


Figura 26. Flujo de gases a través de los cilindros obtenidos en los ensayos de cada uno de los combustibles estudiados.

Cuadro 23. Análisis de varianza utilizando prueba de Tukey para el blowby para cada una de las mezclas.

Mezcla	Blowby (L/min)	SD (L/min)	<i>p</i>
B50	57,70 ^A	±10,34	0,004
B15	60,74 ^A	±15,50	
B5	60,88 ^A	±9,32	
B10	65,12 ^{AB}	±5,81	
B20	69,10 ^{ABC}	±5,46	
B100	104,67 ^{BC}	±6,09	
ULSD	110,51 ^C	±24,86	

Nota: SD: desviación estándar, promedios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

3.6 Consideraciones finales al utilizar biodiésel

Se analizó el efecto de adicionar biodiésel de aceite de oleína de palma en un motor diésel turbo alimentado. Al agregar biodiésel el consumo de combustible disminuye en comparación al diésel en todas las mezclas excepto para B10, además el consumo mínimo de combustible se obtuvo a más bajas revoluciones en comparación al ULSD.

Al utilizar mezclas menores al 20% de biodiésel la potencia se mantiene hasta las 2500 rpm en comparación al combustible diésel, después de estas revoluciones disminuye.

El torque máximo para las mezclas B5, B10 y B15 se obtuvo a más bajas revoluciones en comparación al combustible diésel. Los resultados presentados demuestran que al trabajar con diésel el consumo mínimo se obtiene a 3000 rpm y el torque máximo a 2500 rpm, mientras que al utilizar biodiésel a un 15% el BSFC mínimo y el torque máximo se obtiene a 2000 rpm, lo cual es una ventaja operativa importante debido a que se está obteniendo un mayor torque a más bajas revoluciones y además coincide con el punto de menor consumo de combustible.

La mezcla de biodiésel que presentó los mejores resultados fue la B15, con un bajo consumo de combustible y una disminución de torque y potencia únicamente a 4000 rpm.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten profundizar en investigaciones con mezclas menores al 20% de biodiésel, evaluando las emisiones, el desgaste y el rendimiento del motor a lo largo del tiempo, y así indicar cuales mezclas se pueden utilizar en el parque vehicular costarricense sin que haya algún problema en los vehículos.

CONCLUSIONES

El consumo de combustible disminuye para las mezclas B5, B15 en todas las revoluciones en comparación al diésel convencional. La mezcla que presentó un menor consumo fue la B15.

Al utilizar mezclas de biodiésel se obtiene una disminución en la potencia, debido al bajo poder calorífico. Para las mezclas menores al 20% la potencia disminuye a partir de 3000 rpm. El biodiésel puro presentó la mayor disminución debido a una mayor viscosidad y bajo poder calorífico.

El torque disminuye al utilizar mezclas de biodiésel debido al bajo poder calorífico, sin embargo, al utilizar mezclas de biodiésel menores al 15% se obtiene un torque máximo a más bajas revoluciones en comparación al combustible diésel. El biodiésel puro presentó la mayor disminución en torque debido a una mayor viscosidad y bajo poder calorífico.

La mezcla que presentó los mejores resultados fue la de biodiésel al 15% debido a un menor consumo de combustible, el torque y la potencia disminuyeron únicamente a 4000 rpm respecto al combustible diésel.

RECOMENDACIONES

Realizar ensayos con biodiésel de diferentes materias, para determinar con cual materia prima se obtienen los mejores resultados.

Analizar las emisiones de los gases de escape utilizando mezclas de biodiésel y compararlas con el combustible diésel.

Investigar el desgaste del motor al utilizar mezclas de biodiésel, mediante un análisis químico de los materiales presentes en el aceite utilizado para lubricar el motor.

Realizar pruebas en vehículos particulares para comparar los resultados obtenidos en el dinamómetro.

Evaluar el desgaste del motor al usar mezclas de biodiésel diésel en vehículos particulares para poder predecir el desgaste en la flota vehicular costarricense.

REFERENCIAS

- [1] A. Sarin, “Introduction: Energy Demand”, en *Biodiesel: Production and Properties*, Cambridge, Inglaterra: Royal Society of Chemistry, 2012.
- [2] P. Flores *et al.*, “Plan de Descarbonización del Sector Transporte Terrestre” RECOPE, Cartago, Costa Rica, 2018.
- [3] RECOPE, “Combustibles de Calidad”, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.recope.go.cr/comunicacion/combustibles_de_calidad/.
- [4] B. L. Salvi y N. L. Panwar, “Biodiesel resources and production technologies – A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3680–3689, ago. 2012.
- [5] P. Benjumea, J. Agudelo, y A. Agudelo, “Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends”, *Fuel*, vol. 87, no. 10–11, pp. 2069–2075, ago. 2008.
- [6] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, S. Sharma, y D. Kumari, “Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review”, *Fuel*, vol. 253, pp. 60–71, oct. 2019.
- [7] A. Demirbas, “Biofuels”, en *Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines*, London: Springer London, 2008.
- [8] H. Alfonso *et al.*, VII Plan Nacional de Energía 2015-2030, MINAE, San José, Costa Rica, 2015.
- [9] RECOPE, “Proyectos: Combustibles Alternativos”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.recope.go.cr/proyectos/combustibles-alternativos/>.
- [10] O. Özener, L. Yükses, A. T. Ergenç, y M. Özkan, “Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics”, *Fuel*, vol. 115, pp. 875–883, ene. 2014.

- [11] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon, y N. J. Choi, “Optimization of palm oil biodiesel blends and engine operating parameters to improve performance and PM morphology in a common rail direct injection diesel engine”, *Fuel*, vol. 260, p. 116326, ene. 2020.
- [12] R. Sakthivel, K. Ramesh, R. Purnachandran, y P. Mohamed Shameer, “A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. 5, pp. 2970–2992, feb. 2018.
- [13] O. M. Ali, R. Mamat, N. R. Abdullah, y A. A. Abdullah, “Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel”, *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 59–67, feb. 2016.
- [14] M. J. Abedin, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, S. M. A. Rahman, y I. M. R. Fattah, “Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine”, *Industrial Crops and Products*, vol. 59, pp. 96–104, ago. 2014.
- [15] S. H. Hosseini, A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, y A. Abbaszadeh-Mayvan, “Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends”, *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 201–213, abr. 2017.
- [16] M. A. Kalam, H. H. Masjuki, M. H. Jayed, y A. M. Liaquat, “Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil”, *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 397–402, abr. 2011.
- [17] A. N. Ozsezen y M. Canakci, “Determination of performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled with canola and waste palm oil methyl esters”, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 108–116, 2011.
- [18] S. Jaroonjitsathian, N. Noomwongs, y K. Boonchukosol, “Comprehensive experimental study on the effect of biodiesel/diesel blended fuel on common-rail di diesel engine technology”, *International Journal of Automotive Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 289–298, abr. 2016.

- [19] S. Bari y S. N. Hossain, “Performance and emission analysis of a diesel engine running on palm oil diesel (POD)”, *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 92–99, feb. 2019.
- [20] M. Canakci, “Performance and emissions characteristics of biodiesel from soybean oil”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 219, núm. 7, pp. 915–922, jul. 2005.
- [21] H. Raheman, P. C. Jena, y S. S. Jadav, “Performance of a diesel engine with blends of biodiesel (from a mixture of oils) and high-speed diesel”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 4, no. 6, p. 9, ene. 2013.
- [22] D. H. Qi, L. M. Geng, H. Chen, Y. Z. Bian, J. Liu, y X. C. Ren, “Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil”, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2706–2713, dic. 2009.
- [23] R. Alloune, M. Balistrrou, S. Awad, K. Loubar, y M. Tazerout, “Performance, combustion and exhaust emissions characteristics investigation using *Citrullus colocynthis* L. biodiesel in DI diesel engine”, *Journal of the Energy Institute*, vol. 91, no. 3, pp. 434–444, jun. 2018.
- [24] P. Zareh, A. A. Zare, y B. Ghobadian, “Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in a diesel engine”, *Energy*, vol. 139, pp. 883–894, nov. 2017.
- [25] G. Dwivedi, S. Jain, y M. P. Sharma, “Impact analysis of biodiesel on engine performance—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4633–4641, dic. 2011.
- [26] M. Norhafana *et al.*, “An experimental study of the performance and emission characteristics of a compression ignition (CI) engine fueled with palm oil based biodiesel”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2059, no. 1, p. 20036, ene.2019.
- [27] I. M. Monirul *et al.*, “Assessment of performance, emission and combustion

- characteristics of palm, jatropha and Calophyllum inophyllum biodiesel blends”, *Fuel*, vol. 181, pp. 985–995, oct. 2016.
- [28] A. Nalgundwar, B. Paul, y S. K. Sharma, “Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropha”, *Fuel*, vol. 173, pp. 172–179, jun. 2016.
- [29] M. Habibullah, I. M. Rizwanul Fattah, H. H. Masjuki, y M. A. Kalam, “Effects of Palm–Coconut Biodiesel Blends on the Performance and Emission of a Single-Cylinder Diesel Engine”, *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 2, pp. 734–743, feb. 2015.
- [30] Ş. Efe, M. A. Ceviz, y H. Temur, “Comparative engine characteristics of biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on DI diesel engine”, *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 142–151, abr. 2018.
- [31] A. N. Ozsezen, M. Canakci, y C. Sayin, “Effects of Biodiesel from Used Frying Palm Oil on the Performance, Injection, and Combustion Characteristics of an Indirect Injection Diesel Engine”, *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 1297–1305, mar. 2008.
- [32] B. S. Chauhan, N. Kumar, y H. M. Cho, “A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil and its blends”, *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 616–622, ene. 2012.
- [33] M. Canakci, A. N. Ozsezen, E. Arcaklioglu, y A. Erdil, “Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil”, *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 9268–9280, jul. 2009.
- [34] H. An, W. M. Yang, S. K. Chou, y K. J. Chua, “Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions”, *Applied Energy*, vol. 99, pp. 363–371, nov. 2012.
- [35] K. Muralidharan, D. Vasudevan, y K. N. Sheeba, “Performance, emission and

- combustion characteristics of biodiesel fuelled variable compression ratio engine”, vol. 36,no.8, pp. 5385–5393, ago. 2011.
- [36] H. Raheman y A. G. Phadatare, “Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel”, vol. 27, no. 4, pp. 393–397, 2004.
- [37] N. L. Panwar, H. Y. Shrirame, N. S. Rathore, S. Jindal, y A. K. Kurchania, “Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 2–3, pp. 245–249, feb. 2010.
- [38] K. Reif, *Fundamentals of Automotive and Engine Technology*. Friedrichshafen, Alemania: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [39] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, 8 ed. México:McGraw-Hill Education, 2015.
- [40] B. Kegl, M. Kegl, y S. Pehan, *Green Diesel Engines*, vol. 12. Londres, Inglaterra: Springer London, 2013.
- [41] S. Becher y T. Eggert, *Diesel Engine Management*. Wiesbaden, Alemania: Springer Vieweg, 2014.
- [42] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2 ed. New York, Estados Unidos de América: McGraw-Hill Education, 2018.
- [43] R. D. Atkins, *An Introduction to Engine Testing and Development*. Estados Unidos de América: SAE International, 2009.
- [44] R. van Basshuysen y F. Schafer, *Internal Combustion Engine Handbook - Basics, Components, Systems, and Perspectives*. Estados Unidos de América: SAE International, 2004.
- [45] H. N. Gupta, *Fundamentals of Internal Combustion Engine*. India: Prentice-Hall, 2006.
- [46] C. E. Goering, M. L. Stone, D. W. Smith, y P. K. Turnquist, *Off-Road Vehicle*

- Engineering Principles*. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, Estados Unidos de América, 2003.
- [47] F. G. Lehmann, “Análise da combustão e emissões em motores a biodiesel” tesis de maestría, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2015.
- [48] A. Rovira y M. D. Marta, *Máquinas y motores térmicos: Introducción a los motores alternativos y a las turbomáquinas térmicas*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2016.
- [49] M. J. Moran y H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5 ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [50] L. Salazar, Informe Técnico: Comportamiento de mezclas Gasolina-Etanol, en un motor de encendido por chispa y sus efectos en las emisiones, RECOPE, Cartago, Costa Rica, p. 44, 2018.
- [51] T. Demirbas y A. H. Demirbas, “Bioenergy, green energy. biomass and biofuels”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 32, no. 12, pp. 1067–1075, 2010.
- [52] J. M. García C. y J. A. García L., “Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol”, CITME, Madrid, España, 2006. [En línea]. Disponible en: https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt4_biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf
- [53] A. Demirbas, “Characterization of biodiesel fuels”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 31, no. 11, pp. 889–896, abr. 2009.
- [54] K. Dincer, “Lower emissions from biodiesel combustion”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 30, no. 10, pp. 963–968, mar. 2008.
- [55] *Manual de biocombustibles*, IICA, San José, Costa Rica, 2009.

- [56] A. García Salas, “Estimación del potencial de producción de biocombustibles en Costa Rica a partir de cultivos energéticos , agroenergéticos y aceites usados, al 2021”, Proyecto Final de Graduación de Lic., Escuela de Química, TEC, Cartago, Costa Rica, 2013.
- [57] M. Ahmad, M. Khan, M. Zafar, y S. Sultana, *Practical Handbook on Biodiesel Production and Properties*. Boca Raton, FL, Estados Unidos de America CRC Press, 2012.
- [58] *Biocombustibles. Biodiésel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel*, RTCA 75.02.43:07, Reglamento Técnico Centroamericano, 2007.
- [59] *D976-06(2016) Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América, 2016.
- [60] *D6751–19 Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América 2019.
- [61] Manual de Productos, RECOPE, Costa Rica, 2018.
- [62] *ASTM D613-18a Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América, 2018.
- [63] S. K.A, *Biofueled Reciprocating Internal Combustion Engines*, 1 ed. Boca Raton, FL, Estados Unidos de América: CRC Press, 2017.
- [64] *Productos de petróleo. aceite combustible diésel. especificaciones*, RTCA 75.02.17:13, Reglamento Técnico Centroamericano 2014.
- [65] T. L. Alleman y R. L. McCormick, *Biodiesel Handling and Use Guide*, 5 ed. Estados Unidos de América: U.S. Department of Energy, 2016.
- [66] *D7467-18a Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20)*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América, 2018.

- [67] "BioPro 380 Automated Biodiesel Processor", Springboard Biodiesel, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.springboardbiodiesel.com/biopro380/biopro380..>
- [68] RECOPE, "Diseño banco de motores RECOPE". Laboratorio de Motores, Cartago, Costa Rica, 2016.
- [69] *Road vehicles - Engine test code - Net power*, ISO 1585, International Standard ISO, Estados Unidos de América, 1992.
- [70] *Engine Power Test Code - Spark Ignition and Compression Ignition - As Installed Net Power Rating*, J1349,. SAE International, Estados Unidos de América, sept. 2011.
- [71] *Engine Power Test Code - Spark Ignition and Compression Ignition - Gross Power and Torque Rating*, J1995. SAE International, Estados Unidos de América, ene. 2014.
- [72] L. Salazar, "Información obtenida del Sistema de Parque Vehicular Nacional", dic. 2018. Distribuido por Registro Nacional de Costa Rica [Fichero de datos].
- [73] "Toyota Hilux Technical Specifications" Toyota Media Site, 2014. [En línea]. Disponible en: https://media.toyota.co.uk/wp-content/files_mf/1438873927150506MHiluxtechspec.pdf.
- [74] F. Brunetti, *Motores de Combustão Interna*, vol. 4, São Paulo, Brasil: Blucher, 2012.
- [75] P. Caravaca, "Informe Técnico: Estimación de la Incertidumbre de Medición de Potencia". Departamento de Investigación Laboratorio de Motores RECOPE S.A.
- [76] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, 2 ed. . Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos de América : Pearson Prentice Hall, 2003.

ANEXOS

Anexo A. Parámetros para la determinación del factor de corrección.

Cuadro A1. Exponentes para los factores de corrección atmosféricos [69].

Sistema de presión de carga	Sistema de enfriamiento de la carga de aire	α	β
Aspiración natural	Ninguno	1,0	0,7
Supercargador mecánico	Todos	1,0	0,7
Turbo cargador	Ninguno	0,7	1,2
Turbo cargador	Aire-Aire	0,7	1,2
Turbo cargador	Chaqueta de agua	0,7	0,7
Turbo cargador	Auxiliar de Laboratorio (estándar)	0,7	0,4
Turbo cargador	Auxiliar de Laboratorio (opcional)	0,7	1,2

Cuadro A2. Cálculo del factor del motor [69].

	Fm
$\frac{Q}{R} < 37,2$	0,2
$37,2 > \frac{Q}{R} < 65$	$\left(0,036 \cdot \frac{Q}{R}\right) - 1,14$
$\frac{Q}{R} > 65$	1,2

donde:

$Q = 120000 \cdot F / (D \cdot N)$ para motores cuatro tiempos.

$Q = 60000 \cdot F / (D \cdot N)$ para motores dos tiempos.

$R = Pm_0 / Pa_0$ para todos los motores ($R = 1$ si el motor es de aspiración natural).