

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN
(MEC)”**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
AMBIENTALES**

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:
**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN
(MEC)”**

Realizado por:
CÉSAR MORALES BAYETERO

Director del proyecto:
Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, Ph.D.

Como requisito para la obtención del título de:
**MAGISTER EN ECOEFICIENCIA
INDUSTRIAL MENCIÓN EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Quito, abril de 2020

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, CÉSAR FABRICIO MORALES BAYETERO, con cédula de identidad # 100351001-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA

100351001-1

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Realizado por:

CÉSAR FABRICIO MORALES BAYETERO

como Requisito para la Obtención del Título de:

**MAGISTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
MENCIÓN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ha sido dirigido por el profesor

EDILBERTO LLANES, Ph.D.

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

PhD. JAVIER MARTÍNEZ GÓMEZ

MSc. PAOLO SALAZAR ALVEAR

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



FIRMA

PhD. Javier Martínez



FIRMA

MSc. Paolo Salazar

Quito, abril de 2020

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

DEDICATORIA

A mi madre, por ser el pilar fundamental en mi vida y demostrarme siempre su apoyo incondicional, por todos sus consejos y motivaciones constantes que me han permitido cada día ser una mejor persona.

A mi cuñada y mis sobrinas, por brindarme su apoyo y compañía en todo momento, gracias por llenar de mucha alegría nuestras vidas.

César Morales B.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la salud, inteligencia y sabiduría para alcanzar un objetivo más en mi formación profesional.

A la Universidad Internacional SEK, por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en esta etapa de maestría.

Al Dr. Edilberto Llanes quien con su experiencia, conocimiento y motivación me dirigió en el desarrollo de la presente investigación.

Al MSc. Carlos Mafla y MSc. Paúl Hernández, por todo el apoyo brindado y su valioso aporte en la investigación realizada.

A mi familia, por brindarme en todo momento su cariño y apoyo incondicional, lo que me ha permitido alcanzar todas mis metas y anhelos.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Para someter a:

To be submitted:

Evaluación del comportamiento mecánico y ambiental de combustible alternativo en motores de encendido a compresión (MEC).

César Morales Bayetero^{1, 3*}, Edilberto Llanes-Cedeño², Carlos

Mafla³, Javier Martínez¹, Paolo Salazar²

¹ Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.

² Universidad Internacional SEK, Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Quito, Ecuador.

³ Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ibarra, Ecuador.

***AUTOR DE CORRESPONDENCIA:**

Teléfono: 0986619791; email: cesarf_mb92@hotmail.com

Título corto o Running title: Evaluación mecánica y ambiental con uso de biodiésel

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Resumen.

El biodiésel es uno de los combustibles renovables con mejores alternativas para disminuir la dependencia de los derivados del petróleo y puede ser utilizado en motores de combustión interna como una mezcla diésel y biodiésel sin la necesidad de realizar modificaciones en los mismos. El objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño mecánico y ambiental en motores de encendido a compresión con el uso de biodiésel en proporciones del 5 % (B5), 15 % (B15) y mezclas con aditivo B5A y B15A, mediante la experimentación y uso de equipos de medición automotriz, para su aplicación masiva en los vehículos automotrices. La metodología aplicada se basa en el desarrollo de dos etapas; la primera consiste en la preparación de las mezclas a utilizar en la investigación con el porcentaje de diésel/biodiésel correspondiente para cada una y la segunda el análisis del comportamiento mecánico y ambiental mediante el uso de equipos de diagnóstico como el opacímetro, analizador de gases de escape, dinamómetro automotriz debidamente calibrados y actualizados. El análisis de resultados se realiza mediante la aplicación del software Statgraphics, a través de la formación de combinaciones entre las variables independientes para el análisis en la variación de las variables dependientes de potencia, par motor, opacidad, gases de escape, con la aplicación de las mezclas en los vehículos a prueba. En los resultados se obtiene que la mezcla B5 muestra los mejores valores, logrando mantener la potencia y par motor con disminuciones no significativas respecto al diésel con promedios de 1,11 % y 0,33 %, respectivamente. Se concluye que según se incrementa el porcentaje de biodiésel en las mezclas se reduce el valor de opacidad de 44,8 % con B15 y 59,3 % con B15A. En relación a los gases de escape, las mezclas con aditivos muestran la mayor reducción en las emisiones de CO₂, CO y HC, mientras que las emisiones de NO_x se elevan ligeramente a medida que aumenta la concentración de biodiésel.

Palabras clave: Biodiésel; opacidad; motores diésel; gases contaminantes.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Abstract.

Biodiesel is one of the renewable fuels with the best alternatives to reduce dependence on petroleum derivatives and can be used in internal combustion engines as a mixture of diesel and biodiesel without the need to make modifications to them. The main objective of this work is to evaluate the mechanical and environmental performance in compression ignition engines with the use of biodiesel in proportions of 5% (B5), 15% (B15) and mixtures with additive B5A and B15A, through experimentation and use of automotive measurement equipment, for its massive application in automotive vehicles. The applied methodology is based on the development of two stages; the first consists of preparing the mixtures to be used in the investigation with the corresponding percentage of diesel/biodiesel for each one, and the second, the analysis of mechanical and environmental behavior through the use of diagnostic equipment such as the opacimeter, gas analyzer of exhaust, automotive dynamometer properly calibrated and updated. The analysis of results is carried out by applying the Statgraphics software, through the formation of combinations between the independent variables for the analysis of the variation of the variables dependent on power, torque, opacity, exhaust gases, with the application of the mixtures in the vehicles under test. In the results, it is obtained that the B5 mixture shows the best values, managing to maintain the power and torque with no significant decreases compared to diesel with averages of 1.11% and 0.33%, respectively. It is concluded that as the percentage of biodiesel in the mixtures is increased, the opacity value of 44.8% with B15 and 59.3% with B15A decreases. Regarding exhaust gases, mixtures with additives show the greatest reduction in CO₂, CO and HC emissions, while NO_x emissions rise slightly as the concentration of biodiesel increases.

Keywords: Biodiesel; opacity; diesel engines; polluting gases.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Introducción.

La eficiencia energética es un concepto que se ha instalado con fuerza en los últimos años, donde el agotamiento de las reservas de petróleo, el incremento en el costo de los combustibles fósiles y el cambio climático han sido los principales hechos que han motivado este proceso (Villalobos, 2010). En este contexto, el transporte es uno de los sectores al que se debe brindar mucha importancia debido al impacto que produce en la matriz de consumo energético y su peso en las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes (Villalobos y Wilmsmeier, 2016).

El sector del transporte es un gran consumidor de energía, representando el 61,7 % del consumo global de energía (IEA, 2017a), además es el responsable del 24,4 % en las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionado por la combustión de combustibles fósiles (IEA, 2017b). Por estos motivos se ha visto necesario la búsqueda de nuevas fuentes de energía limpia y renovable que ayuden a disminuir la dependencia del petróleo y sus derivados (Keera, El Sabagh y Taman, 2018). Una de las mejores alternativas es el desarrollo de biocombustibles como el biodiésel, que puede ser utilizado en los motores de combustión interna sin necesidad de modificarlos, reduciendo de esta forma la contaminación ambiental, además, son de naturaleza sostenible y económica a diferencia de los combustibles convencionales (Goga, Chauhan, Mahla, y Cho, 2019a).

El biodiésel es el biocombustible más utilizado y es producido a partir de aceites vegetales como la soya, semillas de algodón, maní, girasol, aceite de palma (Erdiwansyah et al., 2019). Puede ser utilizado en motores diésel como combustible único o como una mezcla de diésel y biodiésel, sin la necesidad de rediseñar la tecnología actual (Keera, El Sabagh, y Taman, 2018b). Muestra mejores características en la calidad de ignición, ausencia de contenido de azufre y aromáticos, capacidad de renovación y biodegradabilidad, reducción del 30 % a 71 %

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

en las emisiones de gases contaminantes (Semwal, Arora, Badoni y Tuli, 2011), además, de proporcionar menor desgaste del motor, menor consumo de aceite del motor y una mejor eficiencia térmica comparada a la que presenta el combustible diésel tradicional (Rajkumar y Thangaraja, 2019).

Sin embargo, investigaciones realizadas reportan ciertas desventajas con el uso del biodiésel, como una mala estabilidad de almacenamiento y propiedades de flujo en frío, menor contenido de calor con características inferiores de pulverización (Misra y Murthy, 2011). Estos inconvenientes pueden ser superados a través de la adecuada elección de materia prima en el desarrollo de biodiésel mediante la transesterificación, proceso que está destinado a reducir la viscosidad y contenido de oxígeno de los aceites vegetales (Adewale, Dumont, y Ngadi, 2015).

De la misma manera se informa que el uso de biodiésel en motores de compresión aumenta las emisiones de NO_x (Abed, Gad, El Morsi, Sayed, y Elyazeed, 2019), que puede ser provocado por el avance de la inyección, aumento de temperatura de la llama, mayor densidad del combustible, (Tamilselvan, Nallusamy y Rajkumar, 2017), y un aumento en la velocidad del proceso de combustión por la presencia de oxígeno unido al combustible (Xue, Grift y Hansen, 2011).

En relación al rendimiento mecánico del motor Rocha, Llanes, Celi y Peralta, (2019), indica que para una mezcla B10 se mantiene el par motor y la potencia con reducciones no significativas del 1,37 % en la potencia y 2,37 % en el par motor. Además, mediante el análisis de las características en el rendimiento y emisiones del motor, indican que el uso de aditivos mejora la combustión, reduciendo el retardo en el encendido y el consumo de combustible (Basha y Raja Gopal, 2012).

A partir de lo abordado anteriormente, y considerando que el transporte es parte de los procesos industriales desde el aseguramiento de la materia prima hasta la comercialización, y el cual representa una de las áreas de mayor impacto ambiental y energético, no solo en el

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Ecuador sino a nivel mundial, es fundamental realizar investigaciones acerca de los diferentes tipos de biocombustibles para evaluar su comportamiento y buscar la mejor alternativa. De este modo se identifica la problemática de cómo se comportarían las emisiones y las características mecánicas del MEC con la aplicación de diferentes proporciones de mezclas de biodiésel y con el uso de aditivos.

La presente investigación tiene el objetivo de evaluar el desempeño mecánico (torque y potencia) y ambiental (opacidad, análisis de gases de escape) en motores de encendido a compresión con proporciones del 5 % (B5), 15 % (B15) y mezclas de biodiésel con aditivo B5A y B15A, mediante la experimentación y uso de equipos de medición automotriz (opacómetro, analizador de gases de escape, dinamómetro automotriz), para su aplicación masiva en los vehículo automotrices.

Para cumplir con el objetivo general se llevan a cabo los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar los valores de torque y potencia de los vehículos diésel, mediante pruebas estáticas realizadas en el dinamómetro automotriz, para analizar el comportamiento del motor con el uso de diésel tradicional y mezclas de biodiésel B5, B15, B5A y B15A.
2. Evaluar los niveles de opacidad y gases de escape emitidos por un motor de encendido a compresión, mediante el uso del opacómetro y analizador de gases, para comparar la variación en los valores de emisiones con el uso de diésel y mezclas B5, B15, B5A y B15A.
3. Analizar los resultados obtenidos mediante la aplicación del software de análisis estadístico Statgraphics, para comparar el desempeño mecánico y ambiental del motor de combustión con el uso de diésel y mezclas biodiésel B5, B15, B5A y B15A.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Producción de Biodiésel.

La materia prima utilizada para la producción de biodiésel pueden ser aceites vegetales de palma, girasol, soya, jatropha, entre otros, además de grasas animales de aves, cerdos (Llanes-Cedeño, Rocha-Hoyos, Salazar Alvear, y Medrano Barboza, 2017). Se han presentado algunos problemas en la selección de los materiales en el desarrollo de biodiésel como: la expansión en la base de materias primas para aumentar el suministro de biodiésel, el uso de tierras agrícolas para la creciente de combustible en lugar de productos comestibles, y el uso de pesticidas y fertilizantes necesarios para cultivar la materia prima que pueden filtrarse en el agua subterránea. Esto ha llevado a la búsqueda de otros aceites vegetales que no generen impacto al medio ambiente (Knothe y Razon, 2017).

Hasta la actualidad se ha desarrollado tres procesos para el desarrollo de biodiésel como son la pirólisis, la micro-emulsificación y la transesterificación. En este sentido, la transesterificación es actualmente el método más atractivo y ampliamente aceptado para la producción de biodiésel, siendo un proceso sencillo y con mejores rendimientos (Llanes-Cedeño et al., 2017).

El propósito del proceso de transesterificación es disminuir la viscosidad del aceite vegetal (Tamilselvan et al., 2017), y generalmente implica el uso de catalizadores de base homogénea que trabaja en condiciones suaves, con la finalidad de cambiar el equilibrio hacia la formación de éster metílico de ácidos grasos (Saleh, Dubé y Tremblay, 2011). Este proceso implica una reacción de triglicéridos y alcohol en contacto de un catalizador para la producción de glicerol y éster (ya sea metilo o etilo). Durante la reacción, el ácido graso del aceite vegetal se transforma en metil/etil éster y el subproducto, glicerol, se separa (Knothe y Razon, 2017). El proceso químico de transesterificación se indica en la figura 1.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

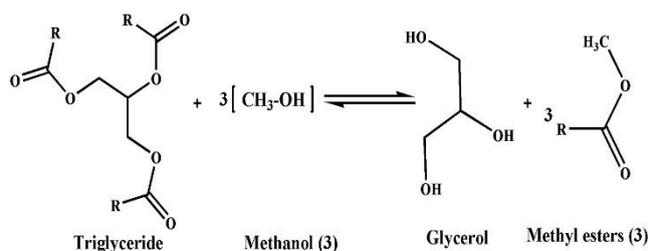


Figura 1. Reacción de transesterificación en la producción de biodiésel. (Tamilselvan et al., 2017)

Sin embargo, el glicerol siempre se produce como un contaminante, siendo el principal inconveniente en la utilización del proceso de transesterificación debido a que reduce la eficacia general del proceso y adicionalmente su eliminación necesita de varios pasos consecutivos de lavado con agua, y por lo tanto, crea una mayor demanda de este elemento (Luna et al., 2014).

La transesterificación se realiza generalmente a través de alcoholes primarios y secundarios, entre los cuales el metanol es el más utilizado por ser un alcohol menos costoso, y además muestra ventajas químicas como su naturaleza polar y su cadena más corta (Onukwuli, Emembolu, Ude, Aliozo y Menkiti, 2017). La reacción de transesterificación es la más conocida y es, en gran medida, material de libros de texto, que puede ser catalizada mediante ácidos y bases, siendo la catálisis básica considerablemente más rápida (Hurtado et al., 2019).

Uso de biodiésel y almacenamiento.

Los combustibles renovables como el biodiésel se utilizan ampliamente en motores de combustión interna (Erdiwansyah et al., 2019). Al utilizar el biodiésel como lubricante en una cantidad de 2 % mejora las propiedades de lubricidad, además puede ser utilizado como combustible para calefacción o en la aviación, aunque el principal problema en este último son sus propiedades de baja temperatura lo que hacen que sea adecuado únicamente en aviones de vuelo a baja altura (S. B. Živković et al., 2017).

Durante el almacenamiento y transporte, el biodiésel puede sufrir procesos de degradación

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

debido a la oxidación, contacto con el agua y los metales, como también la actividad microbiana. Estos procesos pueden conducir a la producción de ácidos, peróxidos, polímeros y sedimentos, conduciendo al aumento de la viscosidad (Jain y Sharma, 2010). En conclusión, el biodiésel tiene un proceso de degradación más rápido que el diésel convencional lo que es bueno en el punto de vista ambiental pero no muy deseable para la calidad del combustible (S. B. Živković et al., 2017).

La estabilidad del biodiésel se encuentra influenciada por las condiciones de almacenamiento y la cantidad de ésteres insaturados, además, el calor, la luz y el aire apresuran su degradación por lo que el tiempo de exposición a estas condiciones deben minimizarse durante el almacenamiento. Por otra parte, el biodiésel también puede degradarse al contacto con el agua que conduce a la formación de ácidos, oxidación de los elementos de los motores y depósitos de almacenamiento. Por estas razones, los tanques de almacenamiento deben limpiarse y secarse de manera correcta mientras que el contacto con el aire debe minimizarse (Christensen y McCormick, 2014).

En general, el efecto antioxidante del biodiésel aumenta según la cantidad de aditivos antioxidantes y se reduce con el grado de insaturación de los ésteres metílicos, por estas razones se recomienda el monitoreo de ácidos, materiales insolubles y el tiempo de inducción para satisfacer las especificaciones de estabilidad de oxidación según los estándares del biodiésel (S. B. Živković et al., 2017).

Emisiones y contaminación del aire.

La consecuencia del uso de combustibles fósiles durante el proceso de combustión está en la generación de emisiones de gases contaminantes, como son: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos sulfurosos (SO_x) (Mafla Yépez et al., 2018). Al utilizar biodiésel en motores de CI se logra la reducción en las emisiones de gases de escape debido a que el biocombustible contiene

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

aproximadamente entre 12-18 carbonos, en cambio la molécula de diésel convencional puede tener hasta 20 carbonos (Amarís, Manrique y Jaramillo, 2015).

Entre los componentes de materia particulada expulsados en los gases de escape, el hollín es conocido como la principal razón detrás de la opacidad del humo. Su formación se encuentra principalmente en la zona rica de combustible, debido a que la presión y temperatura son muy elevadas con escasas de oxígeno (Shahir, Masjuki, Kalam, Imran y Ashraful, 2015). Sin embargo, la formación de estos elementos depende en gran parte de las condiciones de funcionamiento del motor, es decir, según aumenta la carga del motor, la relación aire-combustible disminuye debido al alto porcentaje de inyección de combustible, lo que ocasiona una mayor producción de humo (Can, Çelikten y Usta, 2004).

En la mayoría de las investigaciones realizadas se observa que la emisión de humo reduce al utilizar mezclas de biodiésel a comparación del diésel tradicional, debido a que el enlace atómico del oxígeno y el biodiésel satisface el control químico positivo sobre la formación de hollín (Chen, Shi-Jin y Jian-Xin, 2007). Los resultados de experimentos con uso de mezclas de biodiésel en un motor de combustión interna muestran una reducción del 73 % en las emisiones de HC y una reducción del 46 % en monóxido de carbono (Senthilkumar, Sivakumar, y Manoharan, 2015).

Uno de los elementos de gran importancia en los motores diésel, es la formación de óxidos de nitrógeno, que dependen en gran medida de la temperatura en el cilindro, la concentración de oxígeno, tiempo de residencia para dar lugar a la reacción y la relación de equivalencia. La densidad del combustible, el número de cetano y la composición del combustible aromático pueden influir en la formación de NO_x (Cheenkachorn y Fungtammasan, 2009). Independiente de la mezcla de biodiésel utilizada en los motores, se han registrado muchas variaciones en las emisiones de NO_x, reduciendo su formación en la mayoría de estudios y en ocasiones se informa un ligero aumento, dependiendo de la carga del motor y la disponibilidad de oxígeno

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

(Abed et al., 2019).

En el proceso de la combustión, el subproducto más común es el CO₂, producido por la reacción química del carbono con el oxígeno. Los combustibles oxigenados producen una emisión de CO₂ ligeramente menor, debido a que contiene menos moléculas de carbono. Sin embargo, en altas velocidades y carga del motor en el que se quema más combustible con menor cantidad de oxígeno, este efecto no es invisible, lo que ocasiona una alta emisión de dióxido de carbono (Kowalewicz, 2005).

En la mayoría de los artículos consultados indican una disminución en la formación de CO₂, aunque algunos resaltan un aumento en estas emisiones con la utilización de mezclas ternarias según se incrementa la porción de etanol (Shahir et al., 2015). En relación a la emisión de hidrocarburos no quemados en la combustión, se observa que la mezcla de combustible diésel y biodiésel muestra una disminución en relación al uso del diésel tradicional (Qi et al., 2009).

Rendimiento mecánico.

Investigaciones realizadas han presentado resultados que el uso de biodiésel en motores de compresión ayuda a mejorar el rendimiento mecánico y la reducción de gases contaminantes a la atmósfera (Goga, Chauhan, Mahla, y Cho, 2019b). Algunos documentos indican un incremento en la potencia y par con el uso de biodiésel puro en los motores de combustión (Ogunkunle y Ahmed, 2019).

El análisis del impacto de mezclas de biodiésel en el rendimiento del motor muestran una diferencia poco significativa en los valores obtenidos de potencia y par en el motor de compresión (Ogunkunle y Ahmed, 2019a). Por ejemplo, el uso de mezclas de biodiésel demostró valores casi idénticos en el rendimiento y propiedades de combustión similares al diésel, indicando disminuciones no significativas de 1,37 % en la potencia y 2,37 % en el par motor (Rocha et al., 2019). La combustión con mezclas de biodiésel de ricino al aplicar al

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

vehículo a diferentes condiciones de carga, muestra un aumento en la liberación de calor a medida que la fracciones de biodiésel se incrementan y una reducción con mezclas menores a B5 (Can, Öztürk, y Yücesu, 2017).

El uso de diferentes tipos de aditivos en mezclas de biodiésel ayudan a mejorar el rendimiento en el motor de combustión (Soudagar et al., 2018). Además, la adición de estos elementos mejora las propiedades del combustible, el consumo y reducción de emisiones de gases contaminantes (Khond y Kriplani, 2016).

Contaminación del suelo.

El biodiésel como contaminante del suelo no es tóxico hasta una concentración del 12 %, mientras que el diésel convencional exhibe propiedades tóxicas por encima de solo el 3 % (Lapinskienė, Martinkus y Rėbždaitė, 2006). Además, la introducción del diésel, biodiésel y sus mezclas reduce la cantidad de biomasa microbiana viva en el suelo, donde el combustible diésel contiene compuestos de mayor toxicidad que el biodiésel (S. B. Živković et al., 2017).

El biodiésel tiene un impacto en la biomasa microbiana que se encuentra relacionada con su concentración, de esta manera, la adición de biodiésel con el 1 % de concentración aumenta la biomasa microbiana en el suelo a un 13 %, a una concentración del 5 % reduce la biomasa microbiana y con una concentración del 10 % la contamina (S. Živković y Veljković, 2018). El biodiésel producido en los laboratorios tiene componentes más tóxicos para la cebada, mientras que el biodiésel que se obtiene en una estación de servicio muestra un mayor impacto en el berro de jardín (Pasqualino, Montané, y Salvadó, 2006). Por otro lado, la toxicidad del biodiésel aumentó con mayores concentraciones en muestras de suelo, mientras que en suelos arenosos muestra menos toxicidad que el combustible diésel (Leme et al., 2012).

Además, este tipo de biocombustible puede actuar como un compuesto disolvente biológico en suelos que se encuentran contaminados con diésel convencional, debido al proceso co-metabólico de transformación por el cual los microorganismos utilizan el segundo sustrato

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

como una fuente de energía en el transcurso de degradación del primero (Pasqualino et al., 2006). Por otro lado, el suelo contaminado con biodiésel y sus mezclas con diésel convencional muestran efectos genotóxicos (Leme et al., 2012), y al tener un proceso de respiración menos intensivo, el diésel es más resistente al deterioro microbiano comparado con el biodiésel (S. B. Živković et al., 2017).

Materiales y Métodos.

El presente trabajo se basa en el desarrollo de dos etapas con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados. La primera consiste en la preparación de las mezclas a utilizar en la investigación con el porcentaje de diésel y biodiésel correspondiente para cada una; y la segunda el análisis del comportamiento mecánico, la opacidad y gases de escape emitidos por el motor operando con combustible diésel únicamente y mezclas con biodiésel B5, B15, además de mezclas con aditivo B5A, B15A. Las pruebas son realizadas a 2220 msnm, mediante el uso de equipos de diagnóstico actualizados y debidamente calibrados.

El aditivo en las diferentes muestras se mezclan en la cantidad de 0,07 gramos para galón de combustible, según las indicaciones realizadas por el fabricante. Las propiedades del aditivo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Datos técnicos del aditivo

Punto de ebullición	255°C
Punto de fusión	70°C
Densidad de vapor	5.3 (aire=1)
Presión de vapor	< 1psi
Gravedad específica	1.04
Densidad	0.992
Estabilidad	Estable
Incompatibilidad	Agentes oxidantes fuertes

Fuente: (Ferox, 2018)

Comportamiento del motor diésel.

En el desarrollo de la investigación se busca establecer la variación de los valores en la opacidad, emisión de gases de escape y rendimiento mecánico del motor diésel mediante la

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

aplicación de mezclas biodiésel y diésel tradicional. En las pruebas realizadas con cada mezcla de combustible se desarrollaron cuatro mediciones, con la finalidad de obtener el 95 % de confianza (Lozano-Rivas, 2011).

En la figura 2 se representa el diagrama del proceso de pruebas desarrolladas en los dos vehículos; para ello, las pruebas de opacidad se ejecutaron en un opacímetro Brain Bee Opa-100, el análisis de gases en el analizador Brain Bee AGS-688 y las pruebas mecánicas se desarrollaron en un dinamómetro Vamag BPA-V2R.

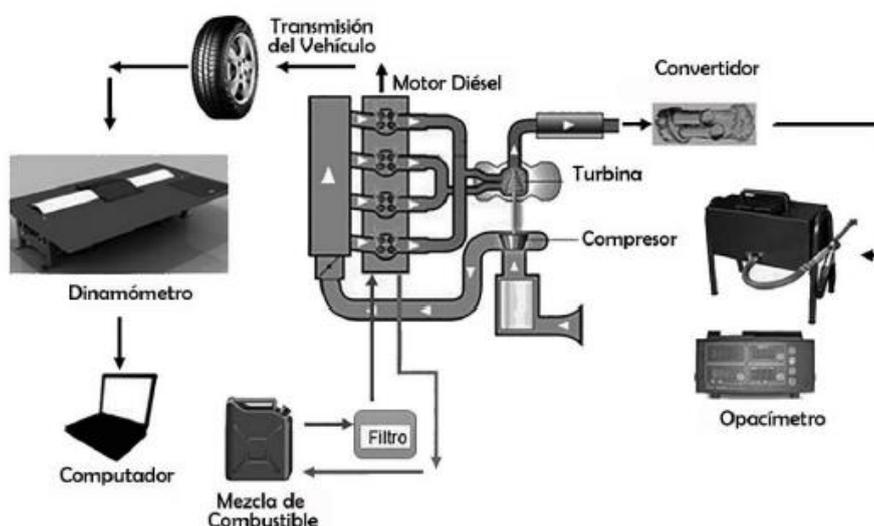


Figura 2. Flujograma del método aplicado (Rocha-Hoyos et al., 2019)

Las características de los vehículos empleados en las diferentes pruebas se indican en la tabla 2.

Tabla 2

Características principales de los vehículos

Modelo	Mazda BT-50 CS 4X2 STD 2.5 FL	Ford Ranger 2.5 TDCi 4X4
Alimentación de combustible	Inyección directa Common Rail	Inyección directa Common Rail
Cilindrada	2500 cc	2500 cc
Potencia	118 CV / 3500 rpm.	143 CV a 3500 rpm
Par motor	266 Nm /2.000 rpm	330 Nm a 1800 rpm
Relación de compresión	18 : 1	18 : 1
Distribución	Doble árbol de levas	Doble árbol de levas
Válvulas por cilindro	4	4

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Procedimiento de pruebas de opacidad.

El valor de opacidad se obtiene a través de la ejecución de ciclos de aceleración libre, para lo cual el vehículo se debe encontrar en buenas condiciones y con el motor operando a temperatura normal de funcionamiento en estado de ralentí. En el procedimiento se debe presionar progresivamente el pedal del acelerador hasta alcanzar revoluciones superiores a 2500 rpm, y se debe mantener en ese estado hasta que el opacímetro calcule y precise los valores obtenidos; finalmente, dejar de acelerar para mantener el motor en el estado de ralentí. Es necesario dejar transcurrir aproximadamente 10 s para iniciar el siguiente ciclo de aceleración libre y para la evaluación de opacidad se debe realizar por lo menos cinco ciclos con el procedimiento descrito anteriormente.

El primer ciclo de aceleración permite retirar el hollín acumulado en el sistema de escape del vehículo y además a que el operador se adapte al adecuado movimiento del acelerador. Los cuatro ciclos restantes de aceleración determinan el promedio del valor máximo de humo emitido y corregidos en cada uno de los ciclos realizados. Según la norma INEN 2202, (2013) y INEN 2207, (2002) los resultados de validación de pruebas en el opacímetro no debe exceder $\pm 2\%$ en el valor de opacidad para los vehículos en prueba, además, el promedio de humo en los cinco ciclos realizados no debe exceder el 5 % de diferencia entre los valores mínimos y máximos (INEN 2202, 2013; INEN 2207, 2002). Las pruebas se realizan con un opacímetro Brain Bee Opa-100 con las siguientes características:

Tabla 3

Características técnicas opacímetro Brain Bee Opa-100

Características técnicas	
Opacidad	De 0 a 99,9 %
Cuenta rrevoluciones	De 300 a 9990 rpm
Temp. Aceite	De 20 a 150 °C
Temp. Humo	De 20 a 400 °C
Tiempo de calentamiento	20 °C – 10 min.
Conexión serie	RS 232
Temp. De funcionamiento	5°C – 40°C
Alimentación	12 volt DC
Peso	5 kg

Fuente: (Brain Bee, 2019a)

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Procedimiento de pruebas de gases de escape.

El análisis de gases de escape se debe realizar con el vehículo a la temperatura normal de operación y para cada mezcla de combustible se ejecutan cuatro mediciones, en los estados de ralentí y 2500 revoluciones (rpm). El tiempo de medición en cada prueba es aproximadamente 30 segundos con la finalidad de asegurar que los valores obtenidos estén estables. La evaluación de gases de escape se realizó para dióxido de carbono CO₂ (%), monóxido de carbono CO (%), hidrocarburos HC (ppm) y óxidos de nitrógeno NO_x (ppm).

Para la evaluación con las diferentes mezclas se debe esperar que el equipo apruebe un período de calentamiento, estabilización y estanqueidad en toda la línea de la sonda de medición para evitar datos erróneos durante el procedimiento. Una vez estable el equipo de medición se debe verificar previamente la limpieza de la sonda para luego introducirla totalmente en el escape del vehículo, y asegurar que se encuentre fija en el sistema de escape durante la medición. Para la toma de datos en ralentí, las revoluciones no deben ser mayores a 1200 rpm, y para los ensayos en altos regímenes se debe acelerar el vehículo hasta 2500 rpm y mantener estable el acelerador durante aproximadamente 10 s. Las pruebas se realizan con un analizador Brain Bee AGS-688 con las siguientes características:

Tabla 4

Características técnicas analizador Brain Bee AGS-688

Características técnicas	
CO	0 A 9.99 % vol
CO ₂	0 A 19.9 % vol
HC	0 A 9999 ppmvol
O ₂	0 A 25 % vol
NO	0 A 5000 ppmvol
Lambda	0.5 A 5
Revoluciones	300 A 9990 rpm
Temp. aceite	20 A 150 °C
Tiempo de calentamiento	20 °C: 10 minutos

Fuente: (Brain Bee, 2019b)

Procedimiento de pruebas de par motor y potencia.

La evaluación del rendimiento mecánico de los vehículos de prueba se realizó a través del uso de un dinamómetro automotriz, donde previamente se debe comprobar que el diámetro de

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

las ruedas del vehículo y la capacidad de peso se encuentren dentro de los valores establecidos por el fabricante del equipo, para luego colocar el vehículo dentro del área del dinamómetro y asegurarlo con correas con la finalidad de evitar que este salga de los rodillos.

Para iniciar con las pruebas se debe asegurar que el motor diésel se encuentre en la temperatura normal de operación y verificar la alineación del tren motriz en relación a los rodillos del dinamómetro mediante el giro de las ruedas a una velocidad de 20 km/h; seguidamente, introducir en el software de aplicación los datos técnicos referentes al vehículo de prueba.

En el desarrollo de las pruebas se debe colocar la marcha del vehículo en 4ta, que establece una relación de transmisión de 1:1; acelerar el vehículo hasta alcanzar la máxima velocidad de “corte de rpm” (entre 4500 y 6000 rpm), finalmente pisar el embrague hasta que el banco de potencia se detiene (Corsini et al., 2016).

Las pruebas se realizan con un dinamómetro de vehículos Vamag BPA-V2R con las siguientes características:

Tabla 5
Características técnicas dinamómetro Vamag BPA-V2R

Características técnicas	
Voltaje de alimentación	220-400 V AC
Frecuencia	50-60 Hz
Corriente nominal	16 A
Masa	1200 kg
Dimensiones	3070x870x310 mm
Presión circuito de aire comprimido	6 bar
Diámetro de rodillo	240 mm
Ancho de rodillo	660 mm
Máxima velocidad (Prueba vehículo)	180 km/h

Fuente: (Vamag, 2017)

Diseño de experimento.

Para la investigación se analiza la variación de las variables de: par motor (Nm), potencia (kW), opacidad (%), monóxido de carbono CO (%), dióxido de carbono CO₂ (%), hidrocarburos HC (ppm) y óxidos de nitrógeno NO_x (ppm), con la aplicación de las diferentes

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

mezclas de diésel/biodiésel en los vehículos a prueba. Para el análisis estadístico se establece

la nomenclatura que se indica en la tabla 6 para las variables independientes y dependientes.

Tabla 6

Designación de nomenclatura para las variables de estudio

Factores	Niveles	Nomenclatura	Designación
Vehículo	Camioneta 1 (MBT-50)	A1	1
	Camioneta 2 (F-RANGER)	A2	-1
Combustibles	Diésel	1	1
	B5	2	2
	B5A	3	3
	B15	4	4
	B15A	5	5

El análisis y comparación de resultados se realiza mediante la aplicación del software Statgraphics, a través del método de superficie de respuesta con la formación de combinaciones como se muestran en la tabla 7, que permitirán una mejor comprensión de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas.

Tabla 7

Tratamientos para el análisis de resultados

Combinaciones		
Nº Combinación	Vehículos	Combustibles
T1	A1	Diésel
T2	A1	B5
T3	A1	B15
T4	A1	B5A
T5	A1	B15A
T6	A2	Diésel
T7	A2	B5
T8	A2	B15
T9	A2	B5A
T10	A2	B15A

Resultados y Discusión.

Luego del desarrollo de las pruebas indicadas en la metodología se realiza el análisis de los valores obtenidos en la variación de potencia, par motor, opacidad y gases de escape, que permiten evaluar el comportamiento de las mezclas experimentadas.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Propiedades del biodiésel.

Se realizó las pruebas de destilación al vacío y viscosidad cinemática a 40 °C en un laboratorio especializado, con la finalidad de verificar que el biodiésel tiene las características adecuadas para ser usado en las mezclas diésel/biodiésel durante la investigación. En la tabla 8 se indican los valores obtenidos en las pruebas realizadas al biodiésel.

Tabla 8
Propiedades del biodiésel

Condiciones ambientales					
Temperatura (°C)	22,6	Humedad relativa (%)	56	Presión (kPa)	72,7
Resultados obtenidos					
Ensayo	Norma	% destilación	Unidad	Valor obtenido	
Destilación al vacío	ASTM D-1160	IBP	°C	129,5	
		5 %	°C	340,7	
		10 %	°C	343,1	
		20 %	°C	344,4	
		30 %	°C	345,5	
		40 %	°C	347,4	
		50 %	°C	348,2	
		60 %	°C	349,2	
		70 %	°C	352,1	
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM-D445	80 %	°C	355,0	
		90 %	°C	405,0	
		-	mm ² /s	4,81	

El volumen a 365 °C corresponde a 87,5 % que equivale a 175 ml de 200 ml de muestra analizada, además, se puede evidenciar que en ensayo de destilación al vacío se recuperó 4,4 ml hasta los 100 °C, lo que indica que el biodiésel presenta sustancias volátiles con temperaturas de evaporación menores o iguales a 100 °C.

Resultados de Par Motor.

En la figura 3 se indica los valores de par motor promedio obtenido en los dos vehículos utilizando diésel y mezclas B5 y B15 a su máximo régimen. El par motor máximo obtenido para MBT-50 fue de 176,25 Nm y muestra en promedio un decrecimiento del 0,43 % y 1,99 % con el uso de mezclas B5 y B15 respectivamente, comparado con los valores obtenidos con el diésel

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

convencional. En cambio para el vehículo F-Ranger se muestra un aumento del 0,24 % en el valor del par motor con el uso de mezcla B5 y un decrecimiento del 0,24 % con el uso de mezclas B15, obteniendo su máximo valor de 307,25 Nm con el diésel convencional. Como promedio general se observa una tendencia a disminuir el valor de par motor según se incrementa la proporción de biodiésel. Los resultados coinciden con los valores obtenidos en la investigación realizada por Rocha-Hoyos et al., (2019), donde indica que las mezclas más óptimas son con porcentajes bajos de biodiésel conservando el valor de par motor sin disminuciones significativas, concluyendo que al aumentar la proporción de biodiésel en las mezclas la eficiencia térmica de la combustión reduce, debido al incremento en la densidad y viscosidad del combustible.

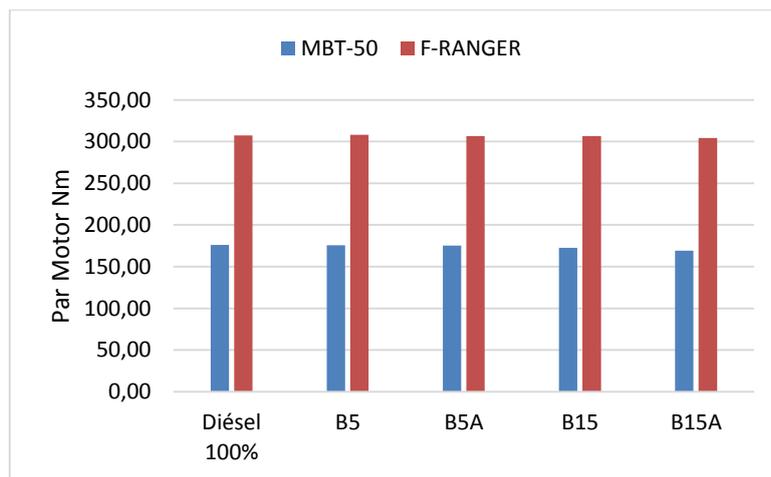


Figura 3. Par motor promedio con diésel y mezclas biodiésel

En la tabla 9 y figura 4, se indica los resultados de la prueba de múltiple rango y gráfico de caja y bigotes para par motor aplicando el análisis de diferencias significativas (LSD) de Fisher con un riesgo del 5.0 %. Los resultados obtenidos muestran que existe una diferencia significativa entre los vehículos de prueba, en las que el vehículo F-Ranger muestra mejores resultados; de igual forma los dos vehículos tienen una misma tendencia a disminuir el par motor con el empleo de aditivo en las mezclas de biodiésel B5A y B15A.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Tabla 9

Análisis de diferencias significativas LSD - Par Motor

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T5_A1B15A	4	169,0	X
T4_A1B15	4	172,75	X
T3_A1B5A	4	175,25	X
T2_A1B5	4	175,5	X
T1_A1Diésel	4	176,25	X
T10_A2B15A	4	304,25	X
T9_A2B15	4	306,5	X
T8_A2B5A	4	306,5	X
T6_A2Diésel	4	307,25	X
T7_A2B5	4	308,0	X

Gráfico Caja y Bigotes

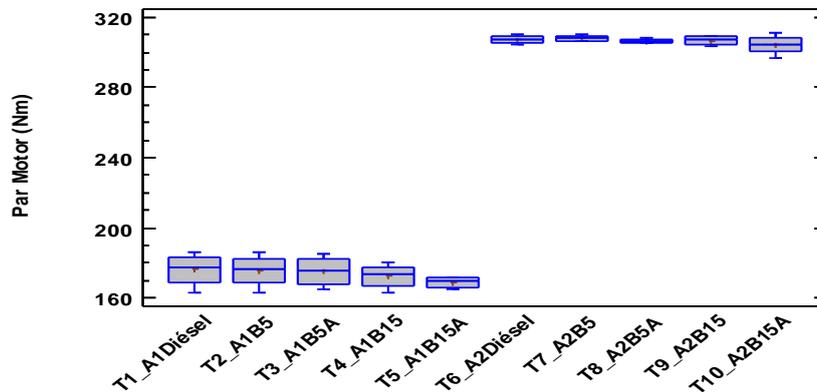
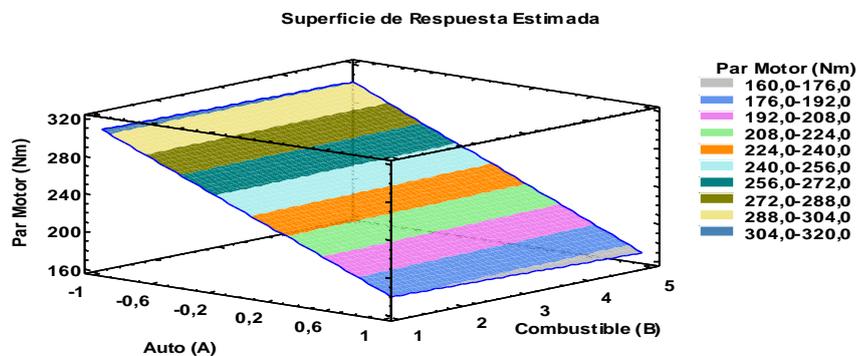


Figura 4. Gráfico caja y bigotes de par motor entre los vehículos y combustibles

La figura 5 indica la relación que tiene la variable par motor en función de los vehículos y tipo de combustible, de esta forma se define el modelo matemático que relaciona las variables, donde los mejores resultados se alcanza con el uso de biodiésel en porcentajes bajos, en el caso de estudio mezcla B5, llegando a un valor promedio de 240,12 Nm; destacándose la influencia de los vehículos, como se indica en la figura 6 de Pareto.



$$Par\ Motor = 243,838 - 64,9125 * A - 1,2375 * B - 0,4875 * A * B$$

Figura 5. Superficie de respuesta estimada de la variable par motor.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

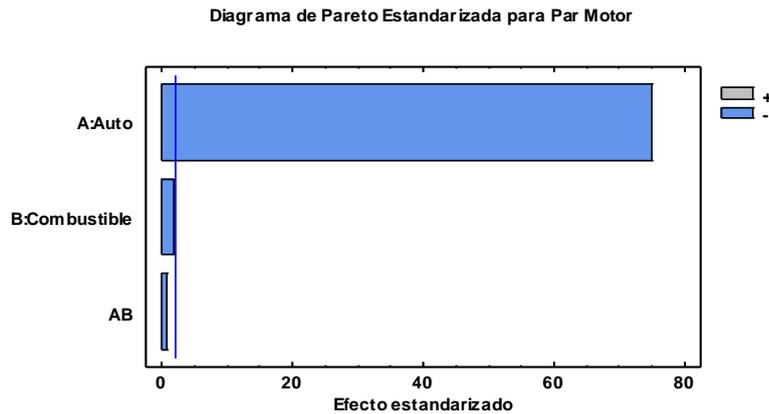


Figura 6. Diagrama de Pareto estandarizada para par motor.

Resultados de potencia.

La figura 7 presenta el valor de la potencia para los dos vehículos con el uso de mezclas B5, B5A, B15, B15A y diésel convencional a máximos regímenes. La medida de potencia para los vehículos es mayor con el uso de diésel convencional, mientras que con mezclas biodiésel B5 y B15 existe un decrecimiento del 1,83 % y 8,23 % respectivamente para la MBT-50; mientras que para el vehículo F-Ranger existe una reducción del 0,40 % con B5 y de 1,51 % con B15. Al igual que en los valores del par motor, la potencia de los vehículos tienden a disminuir en su valor a medida que se aumenta el porcentaje de biodiésel. Los resultados concuerdan con los datos obtenidos por Rocha-Hoyos et al., (2019) y Erdiwansyah et al., (2019), donde indican que las mezclas más óptimas son con porcentajes bajos de biodiésel logrando mantener la potencia sin disminuciones significativas, debido a los valores de calentamiento más bajos en comparación con el diésel convencional.

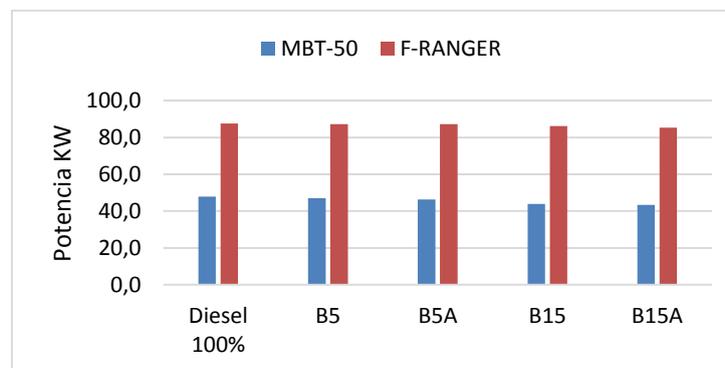


Figura 7. Potencia promedio con diésel y mezclas biodiésel

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

En la tabla 10 y figura 8, se muestra los resultados de la prueba de múltiple rango y gráfico de caja y bigotes de la potencia aplicando el análisis de diferencias significativas (LSD) de Fisher con un riesgo del 5.0 %. En los resultados se observa una diferencia significativa de los vehículos, donde el vehículo 2 obtiene los mejores resultados; de igual manera se aprecia la tendencia a disminuir el valor de la potencia máxima en los 2 vehículos con el empleo de aditivos en los combustibles B5A y B15A, comparados con el diésel convencional.

Tabla 10
Análisis de diferencias significativas LSD - Potencia

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T5_A1B15A	4	43,35	X
T4_A1B15	4	43,85	XX
T3_A1B5A	4	46,3	XXX
T2_A1B5	4	46,9	XX
T1_A1Diésel	4	47,775	X
T10_A2B15A	4	85,375	X
T9_A2B15	4	86,225	X
T8_A2B5A	4	87,175	X
T7_A2B5	4	87,2	X
T6_A2Diésel	4	87,55	X

Gráfico Caja y Bigotes

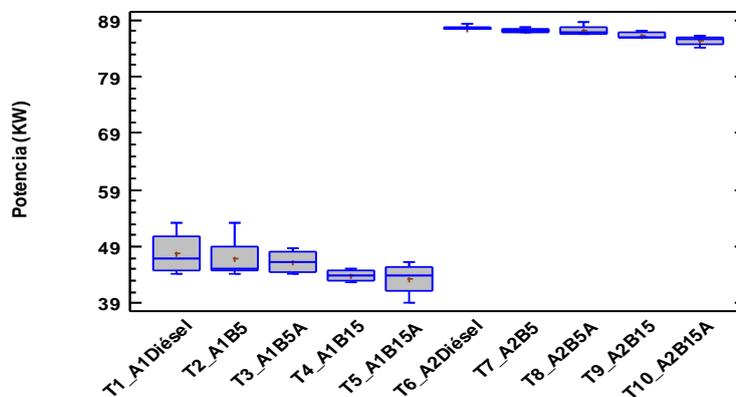
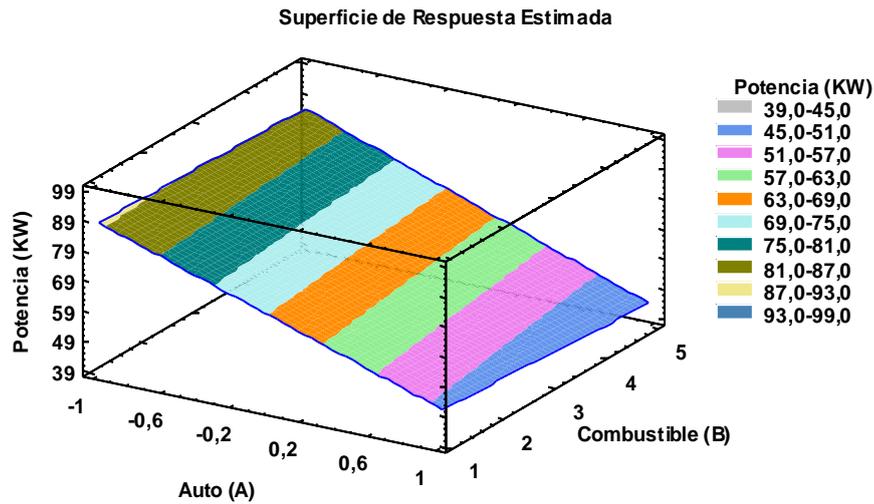


Figura 8. Gráfico caja y bigotes de potencia entre los vehículos y combustibles

La menor reducción de potencia para los dos vehículos se obtuvo con el combustible B5 y la mayor reducción de su valor con el uso de la mezcla B15A respecto al diésel. La figura 9 indica la relación de la variable potencia en función de los vehículos y tipo de combustible, definiendo su modelo matemático, llegando a un valor promedio de 67,15 Kw; destacándose la influencia de los vehículos, como se observa en la figura 10 de Pareto.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”



$Potencia = 69,7392 - 18,7228 * A - 0,86125 * B - 0,32875 * A * B$
 Figura 9. Superficie de respuesta estimada de la variable potencia.

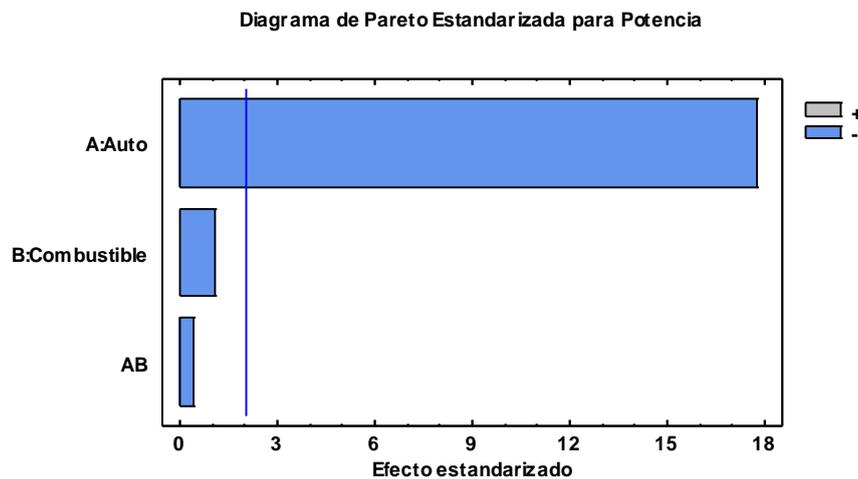


Figura 10. Diagrama de Pareto estandarizada para potencia.

Resultados de opacidad.

La figura 11 muestra el nivel de opacidad obtenido con los combustibles aplicados en el vehículo MBT-50, donde se evidencia que al utilizar la mezcla B15A se obtiene la mayor reducción en el valor de la opacidad de un 59,3 % y el B5 con un 40,1 % que tiene una menor reducción con respecto al diésel. En el caso del vehículo F-Ranger se obtiene la mayor reducción en la opacidad con la mezcla B15 en un 44,8 % y una menor reducción con el B5A con un 26,4 % con respecto al diésel. Los resultados alcanzados coinciden con los obtenidos por Yépez et

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

al., (2018), donde concluye que al utilizar mezclas de biodiésel, el nivel de opacidad disminuye hasta en un 96 % con respecto a la utilización del diésel fósil, debido a la mejor oxidación de la mezcla y al aumento en la temperatura de la cámara de combustión.



Figura 11. Opacidad promedio con diésel y mezclas biodiésel

En la tabla 11 y figura 12, se muestra los resultados de la prueba de múltiple rango y gráfico de caja y bigotes de la opacidad aplicando el análisis de diferencias significativas (LSD) de Fisher con un riesgo del 5.0 %. Los resultados muestran una diferencia significativa de los vehículos, siendo el vehículo 1 el que presenta mejores resultados y se observa la misma tendencia en los dos vehículos a disminuir la opacidad a medida que se aumenta el porcentaje de biodiésel.

Tabla 11

Análisis de diferencias significativas LSD - Opacidad

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T9_A2B15	4	0,9	X
T7_A2B5	4	1,0	X
T10_A2B15A	4	1,1	X
T8_A2B5A	4	1,2	X
T6_A2Diésel	4	1,625	X
T5_A1B15A	4	1,8	X
T3_A1B5A	4	1,875	X
T4_A1B15	4	1,925	X
T2_A1B5	4	2,65	X
T1_A1Diésel	4	4,425	X

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Gráfico Caja y Bigotes

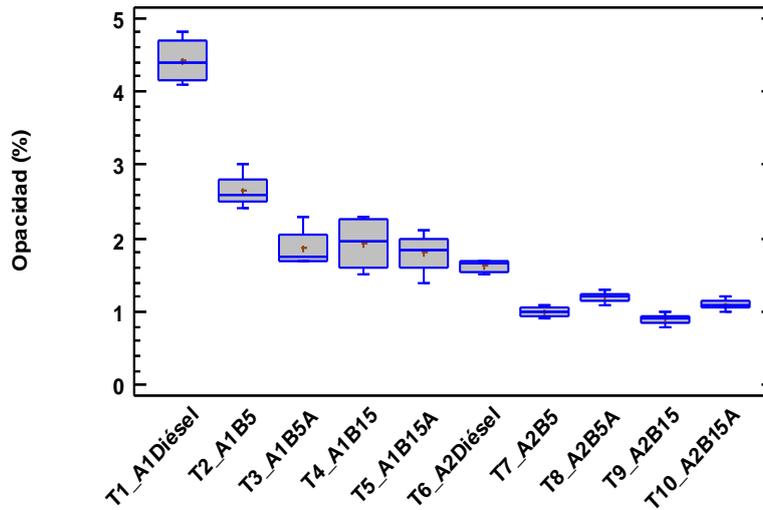
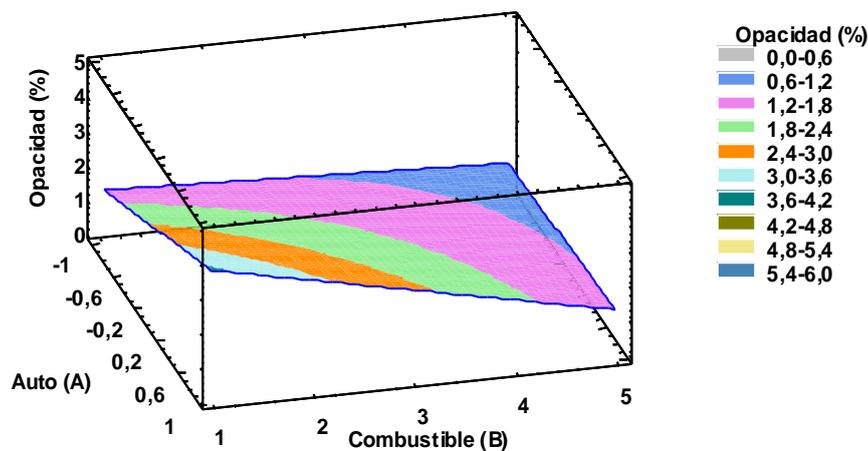


Figura 12. Gráfico caja y bigotes de opacidad entre los vehículos y combustibles

En la figura 13 se muestra la relación existente entre la variable de opacidad en función de los vehículos y tipo de combustible, donde se define su modelo matemático, y se observa que los valores mínimos se obtiene con la mezcla B15A, llegándose al valor promedio de 2,39 % de opacidad; además, se observa la influencia de los combustibles y, como indica la figura 14 de Pareto.

Superficie de Respuesta Estimada



$$Opacidad = 2,91875 + 1,40875 * A - 0,35625 * B - 0,24125 * A * B$$

Figura 13. Superficie de respuesta estimada de la variable opacidad.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

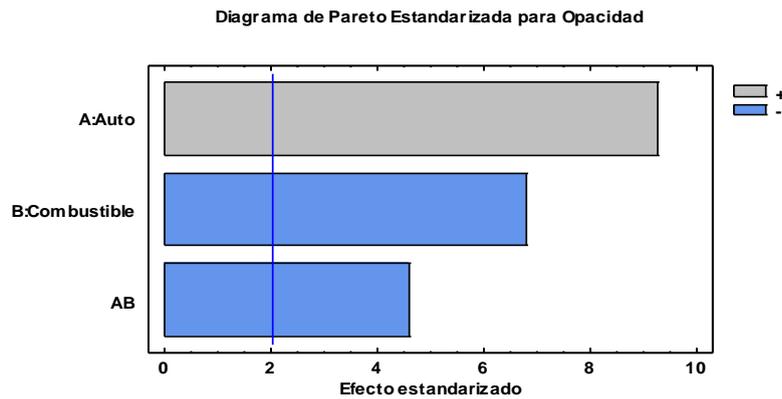


Figura 14. Diagrama de Pareto estandarizada para par motor.

Resultados gases de escape.

La figura 15 muestra el promedio de emisiones de CO₂ con cada uno de los combustibles empleados en los estados de ralenti y 2500 rpm. En el caso del vehículo MBT-50, se evidencia que con la mezcla B5A se obtiene la mayor reducción de CO₂ en 12,8 % en ralenti y de 15,5 % en altas rpm, con respecto al diésel. En el caso del vehículo F-Ranger se presenta la mayor reducción de CO₂ con la mezcla B15A de 10 % y 15,1 % en los estados de ralenti y 2500 rpm respectivamente.

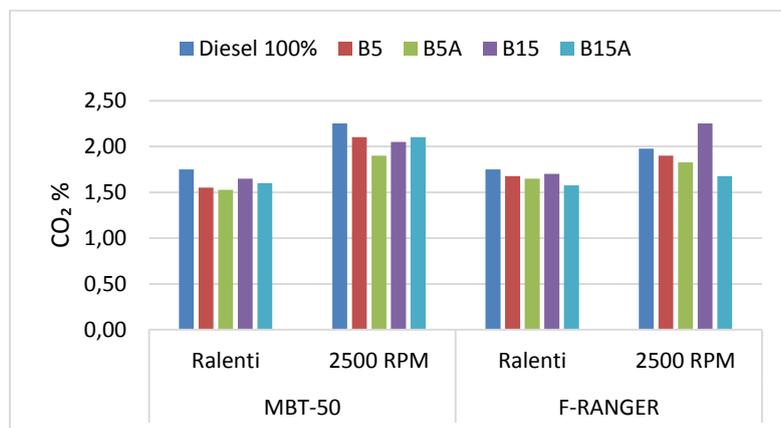


Figura 15. CO₂ promedio con diésel y mezclas biodiésel

La figura 16 indica el promedio de emisiones de CO para cada combustible en cada uno de los vehículos de prueba, en la que se obtuvo la mayor reducción de emisiones con la mezcla B5A en los dos vehículos y estados de regímenes de funcionamiento. En el caso del vehículo MBT-50, se consiguió una reducción de emisiones del 88,2 % en ralenti y de 35,4 % a 2500 rpm;

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

mientras que en el vehículo F-Ranger se presenta la mayor reducción de CO del 47,8 % y 23,01 % en bajas y altas rpm, respectivamente. Los resultados adquiridos concuerdan con los obtenidos por Fangsuwannarak, Wanriko, y Fangsuwannarak, (2016), donde encontró que las emisiones de gases CO y CO₂ disminuyen al usar aditivos en mezclas biodiésel alimentadas a un motor diésel, bajo la velocidad del motor a 3000 rpm.

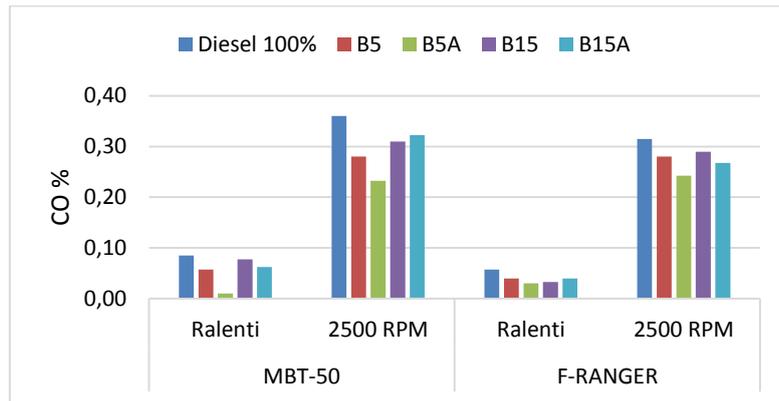


Figura 16. CO promedio con diésel y mezclas biodiésel

En las emisiones de HC para el vehículo MBT-50 se obtiene los mejores resultados con la mezcla B15A, con una reducción del 70 % en ralenti y 89,6 % a 2500 rpm. En cambio para F-Ranger se obtiene una disminución del 87,5 % en bajas rpm y 66,6 % en altas rpm con el empleo de la mezcla B5A, con respecto a los valores del diésel convencional. En la figura 17 se indica el promedio de emisiones de HC con cada uno de los combustibles empleados en los estados de ralenti y 2500 rpm.

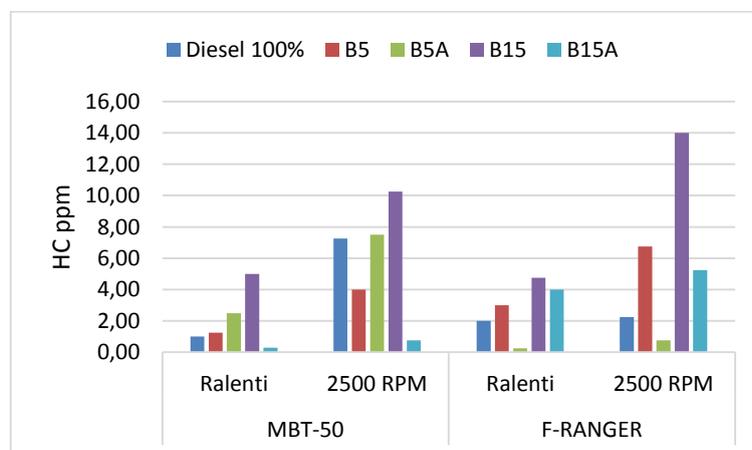


Figura 17. HC promedio con diésel y mezclas biodiésel

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

En la figura 18 se indica el promedio de emisiones de NOx en los estados de ralentí y 2500 rpm con cada uno de los combustibles empleados. En la mayoría de mezclas empleadas en los dos vehículos presentan un ligero aumento de emisiones de NOx, de esta forma, en el vehículo MBT-50, se evidencia que con la mezcla B5 se obtiene la menor emisión de NOx en ralentí y con B5A a 2500 rpm. En el caso del vehículo F-Ranger se presenta la mayor reducción de emisiones con la mezcla B15A a ralentí y con B5 a 2500 rpm. Yasin et al., (2015), al realizar pruebas con biodiésel a bajas proporciones, concluye que los parámetros de emisiones de CO₂, CO y HC varían con la velocidad del motor reduciendo sus valores con respecto al diésel convencional, además, se obtiene un aumento no significativo en las emisiones de NOx, resultados que concuerdan con la investigación de Sinha y Murugavelh, (2016) y los obtenidos en la experimentación.

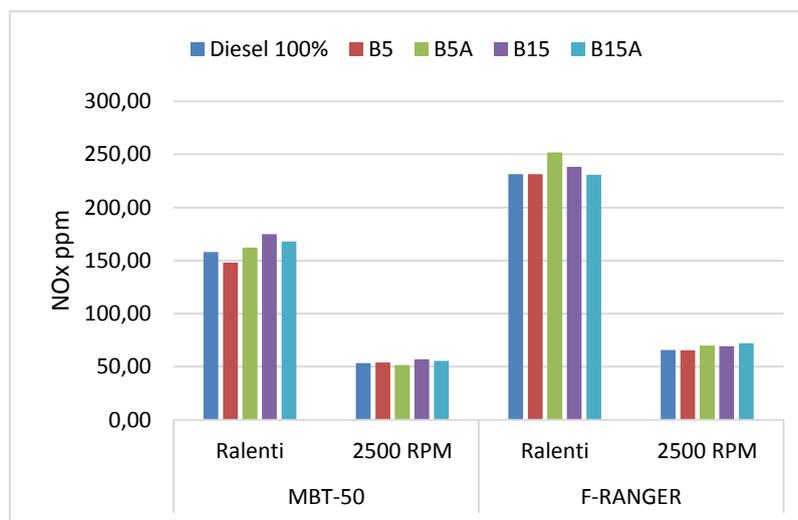


Figura 18. NOx promedio con diésel y mezclas biodiésel

La figura 19 muestra la relación existente entre la emisión de CO₂ en función de los vehículos, tipo de combustible empleado y régimen, donde se define su modelo matemático, obteniendo los valores mínimos con el combustible B15A para bajos y altos rpm, llegándose al valor promedio de 1,79 %; destacándose la influencia del régimen como se indica en la figura 20

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

de Pareto.

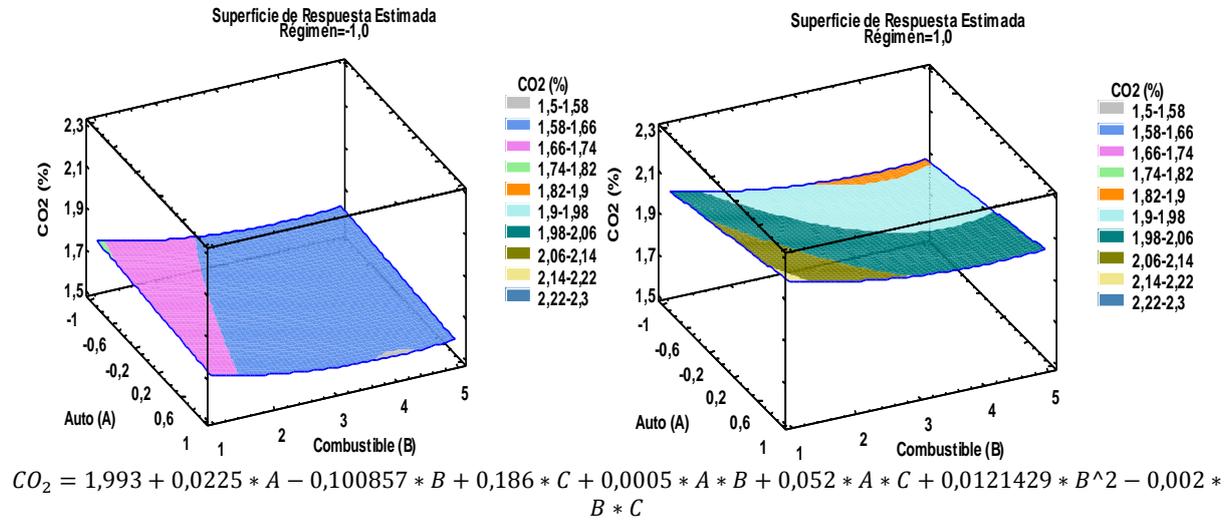


Figura 19. Superficie de respuesta estimada de la variable CO₂.

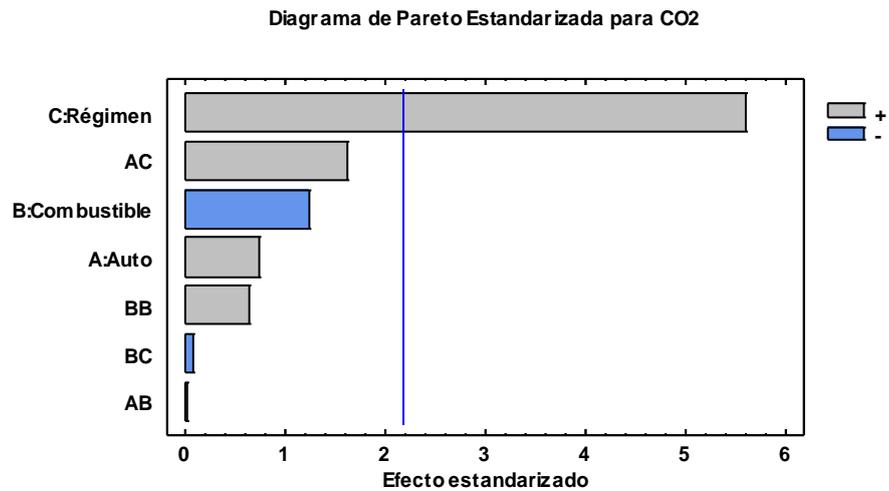


Figura 20. Diagrama de Pareto estandarizada para CO₂.

En la figura 21 se indica la relación de emisiones de CO en función de las variables independientes, definiendo el modelo matemático que los relaciona con el tipo de combustible, vehículos y régimen. De esta forma se obtiene la menor emisión con el combustible B5A para ralentí y B15 para 2500 rpm, con un valor promedio de 0,14 % de CO, en el que se destaca la influencia del régimen seguido del combustible, como se indica en la figura 22.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

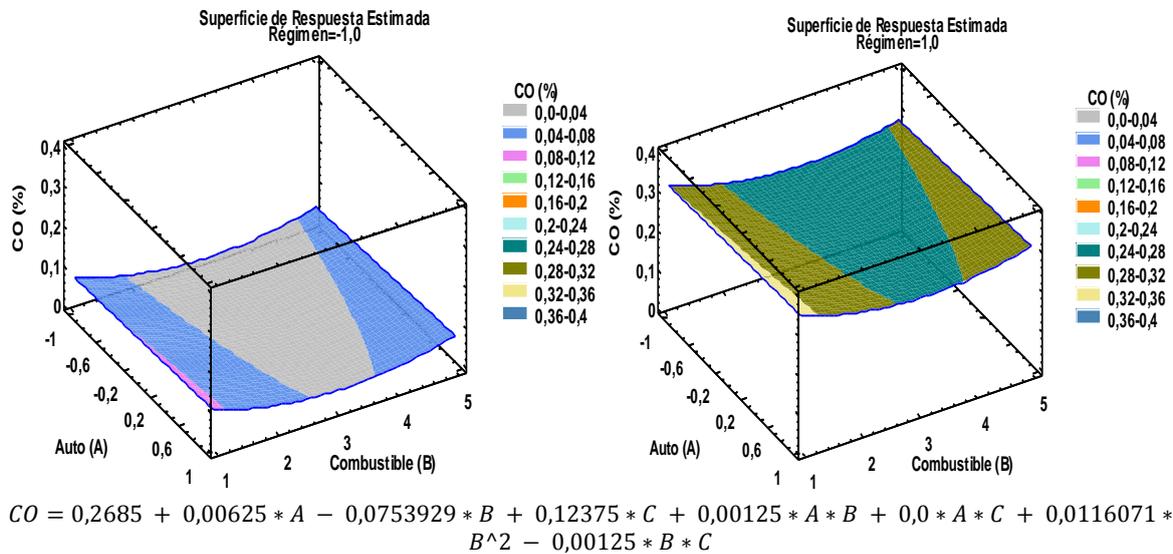


Figura 21. Superficie de respuesta estimada para el análisis del CO.

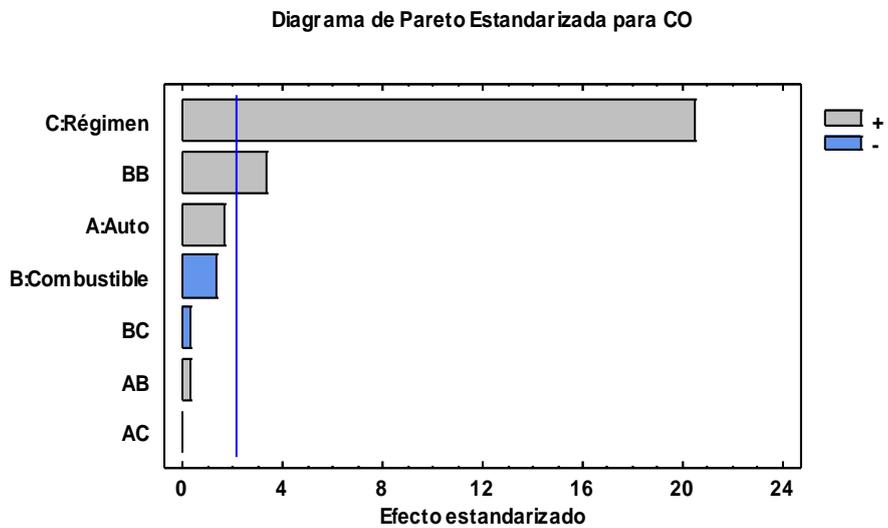


Figura 22. Diagrama de Pareto estandarizada para CO.

La figura 23 muestra las emisiones de HC en relación del tipo de combustible, vehículos y régimen, en el cual los mejores valores se obtienen con el combustible B15 y B15A en el estado de ralentí y B15A en 2500 rpm, definiendo el modelo matemático que los relaciona y llegándose al valor promedio de 5,04 ppm; destacándose la influencia del régimen como se indica en la

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

figura 24 de Pareto.

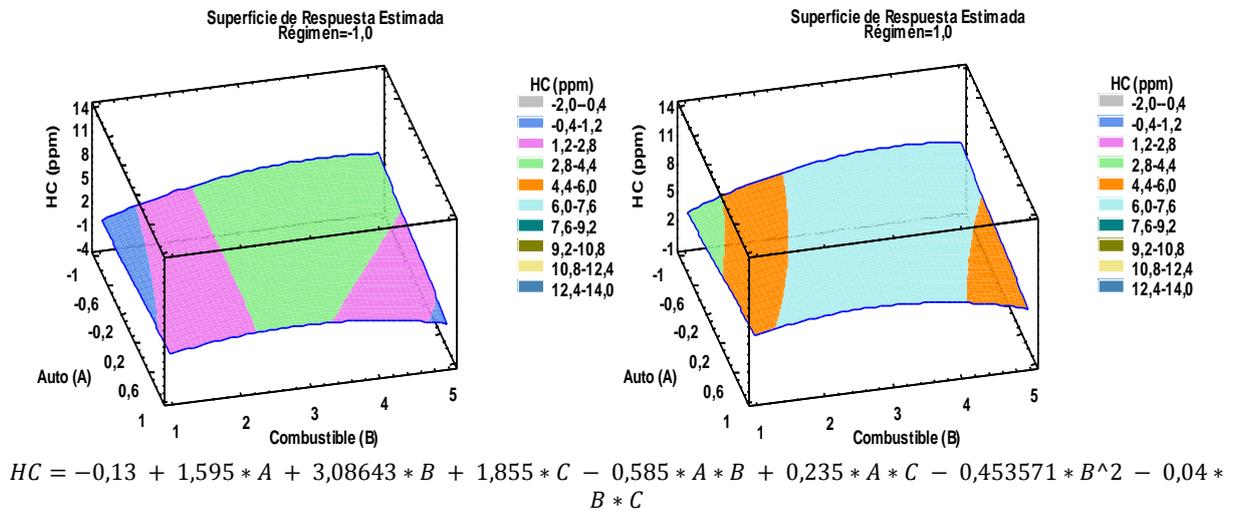


Figura 23. Superficie de respuesta estimada para el análisis de HC.

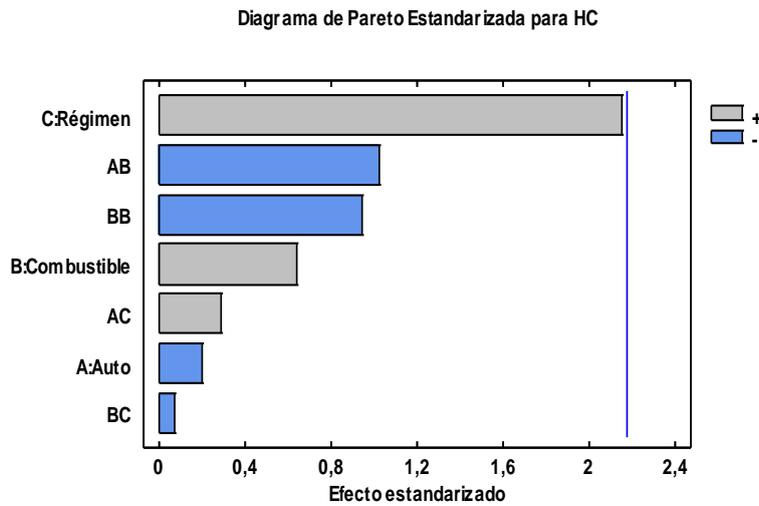


Figura 24. Diagrama de Pareto estandarizada para HC.

La figura 25 representa la relación que posee las emisiones de NOx en función de los vehículos, tipo de combustible y régimen, donde se define su modelo matemático, obteniendo los mejores valores con el uso de porcentajes bajos de biodiésel, siendo el combustible B5 el de mejores resultados para los dos estados de régimen, llegándose al valor promedio de 131,9 ppm; destacándose la influencia del régimen seguido del vehículo, como se indica en la figura 26 de

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Pareto.

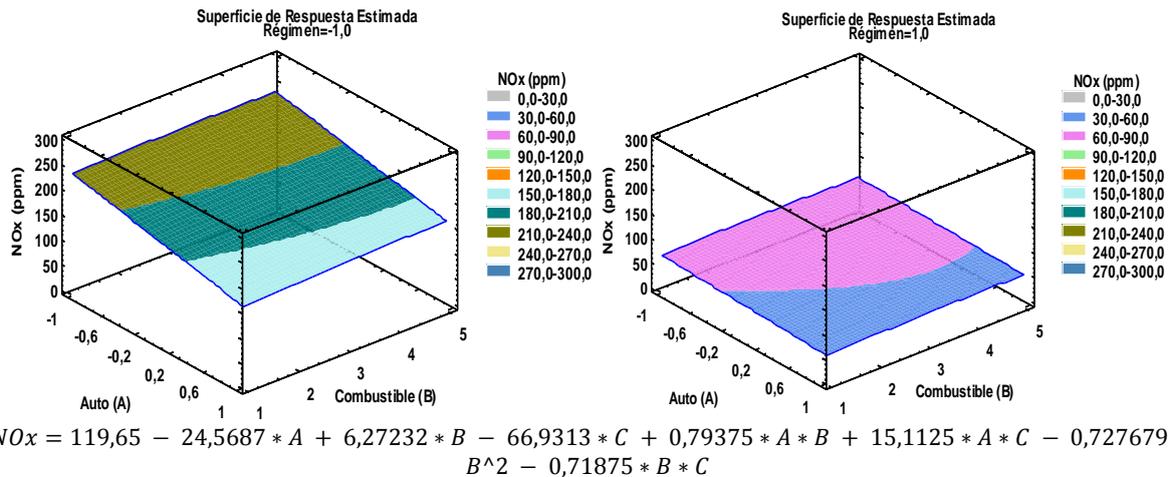


Figura 25. Superficie de respuesta estimada para el análisis de NOx.

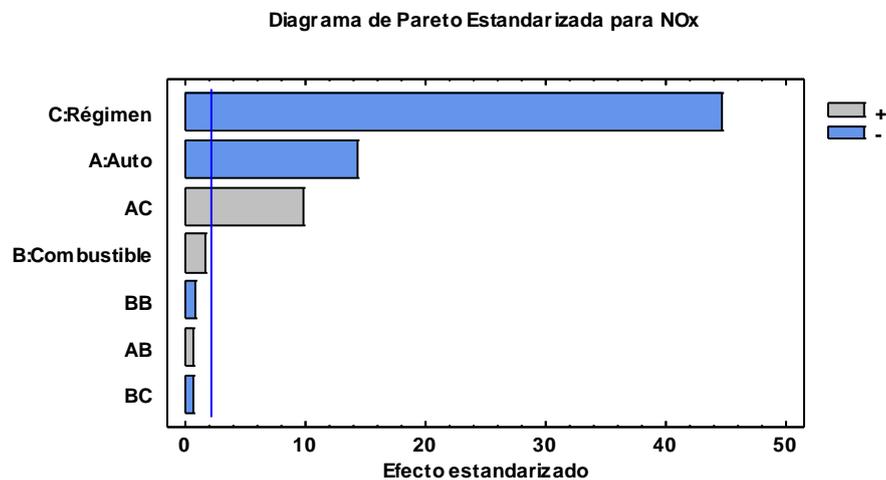


Figura 26. Diagrama de Pareto estandarizada para NOx.

Conclusiones.

Luego de realizar las pruebas mecánicas y ambientales con las mezclas de biodiésel, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Las pruebas mecánicas realizadas muestran que la mejor mezcla es B5 debido a que se tiene una disminución no significativa, logrando mantener la potencia y par motor para los dos vehículos con respecto al diésel convencional. De esta forma para el vehículo MBT-50 se obtuvo una disminución del 0,43 % del par motor y de 1,83 % en potencia; mientras que en el vehículo F-Ranger se obtiene un aumento del 0,24 % en par motor y

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

- reducción de 0,40 % en potencia. Los resultados muestran que según se incrementa el porcentaje de biodiésel en las mezclas existe una reducción en la eficiencia térmica de la combustión, ocasionado por el incremento de la viscosidad del combustible.
2. Los resultados de opacidad muestran una reducción del 59,3 % con el uso de la mezcla B15A en el vehículo MBT-50, y de 44,8 % con la mezcla B15 en la F-Ranger, concluyendo que el valor de opacidad disminuye según se aumenta el porcentaje de biodiésel, contribuyendo de esta forma a minimizar la contaminación.
 3. El análisis de gases de escape se realizó en dos estados de régimen del motor obteniendo reducción en las emisiones de CO₂, CO, HC y un ligero aumento en NO_x. En el estado de ralentí, el vehículo MBT-50 obtuvo una reducción del 12,8 % en CO₂ y 88,2 % en CO con el uso de la mezcla B5A, reducción del 70 % de HC con B15A y los mejores valores (mínimos) con el uso de B5 para NO_x. La F-Ranger en cambio obtuvo una reducción del 10 % de CO₂ con mezcla B15A; 47,8 % de CO con B5A; 87,5 % de HC con B5A y la menor emisión de NO_x con B15A.
 4. En el estado de máximo régimen (2500 rpm), la MBT-50 obtuvo una reducción de 15,5 % de CO₂ y 35,4 % de CO con la mezcla B5A, disminución del 89,6 % en HC con B15A y la menor emisión con B5A para NO_x. El vehículo F-Ranger disminuyó en 26,4 % en emisiones de CO₂ con el uso de B15A; 15,1 % en CO con B5A; reducción del 66,6 % en HC y los mejores resultados para NO_x con la mezcla B5. Los resultados indican la mayor disminución de gases contaminantes CO₂, CO y HC con el uso de aditivos en las mezclas biodiésel, mientras que las emisiones de NO_x se elevan ligeramente según se incrementa la concentración de biodiésel, esto puede ser provocado por el aumento de la temperatura de la combustión.

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., y Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.03.001>
- Adewale, P., Dumont, M. J., y Ngadi, M. (2015). Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.039>
- Amarís, J. M., Manrique, D. A., y Jaramillo, J. E. (2015). BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA Y SU IMPACTO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA. UNA REVISIÓN. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 13(2), 23–34. <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n2-2015003>
- Basha, S. A., y Raja Gopal, K. (2012). A review of the effects of catalyst and additive on biodiesel production, performance, combustion and emission characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 711–717. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.08.036>
- Brain Bee. (2019a). Características opacímetro. Retrieved from <https://brainbee.mahle.com/es/lineas-de-productos/emission/emission-opa-100/>
- Brain Bee. (2019b). Características Analizador de Gases. Retrieved from <https://brainbee.mahle.com/es/lineas-de-productos/emission/emission-ags-688>
- Can, Ö., Çelikten, İ., y Usta, N. (2004). Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures. *Energy Conversion and Management*, 45(15–16), 2429–2440. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2003.11.024>
- Can, Ö., Öztürk, E., y Yücesu, H. S. (2017). Combustion and exhaust emissions of canola

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

biodiesel blends in a single cylinder DI diesel engine. *Renewable Energy*, 109, 73–82.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.017>

Cheenkachorn, K., y Fungtammasan, B. (2009). Biodiesel as an Additive for Diesohol.

International Journal of Green Energy, 6(1), 57–72.

<https://doi.org/10.1080/15435070802701819>

Chen, H., Shi-Jin, S., y Jian-Xin, W. (2007). Study on combustion characteristics and PM

emission of diesel engines using ester–ethanol–diesel blended fuels. *Proceedings of the*

Combustion Institute, 31(2), 2981–2989. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2006.07.130>

Christensen, E., y McCormick, R. L. (2014). Long-term storage stability of biodiesel and

biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, 128, 339–348.

<https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2014.07.045>

Corsini, A., Di Antonio, R., Di Nucci, G., Marchegiani, A., Rispoli, F., y Venturini, P. (2016).

Performance Analysis of a Common-rail Diesel Engine Fuelled with Different Blends of Waste Cooking oil and Gasoil. *Energy Procedia*, 101, 606–613.

<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.11.077>

Erdiwansyah, Mamat, R., Sani, M. S. M., Sudhakar, K., Kadarohman, A., y Sardjono, R. E.

(2019, November 1). An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines. *Energy Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.009>

Fangsuwannarak, K., Wanriko, P., y Fangsuwannarak, T. (2016). Effect of Bio-polymer

Additive on the Fuel Properties of Palm Biodiesel and on Engine Performance Analysis and Exhaust Emission. In *Energy Procedia* (Vol. 100, pp. 227–236). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.170>

Ferox. (2018). No Title. Retrieved from <https://feroxfueltabs.com>

Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K., y Cho, H. M. (2019a). Performance and emission

characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy*

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Reports, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.002>

Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K., y Cho, H. M. (2019b). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy Reports*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.002>

Hurtado, B., Posadillo, A., Luna, D., Bautista, F., Hidalgo, J., Luna, C., ... Estevez, R. (2019). Synthesis, Performance and Emission Quality Assessment of Ecodiesel from Castor Oil in Diesel/Biofuel/Alcohol Triple Blends in a Diesel Engine. *Catalysts*, 9(1), 40. <https://doi.org/10.3390/catal9010040>

IEA. (2017a). *CO2 Emissions from Fuel Combustion*: International Energy Agency

IEA. (2017b). *World energy balances and statistics*: International Energy Agency

INEN 2202. (2013). *Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de Motores de Diésel Mediante la Prueba Estática. Método De Aceleración Libre; Primera*. Quito-Ecuador.

INEN 2207. (2002). *Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites Permitidos de Emisiones por Fuentes Móviles Terrestres de Diésel; Primera*. Quito-Ecuador.

Jain, S., y Sharma, M. P. (2010). Stability of biodiesel and its blends: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 667–678. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.10.011>

Keera, S. T., El Sabagh, S. M., y Taman, A. R. (2018a). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 979–984. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.02.007>

Keera, S. T., El Sabagh, S. M., y Taman, A. R. (2018b). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 979–984. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.02.007>

Khond, V. W., y Kriplani, V. M. (2016, June 1). Effect of nanofluid additives on

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

- performances and emissions of emulsified diesel and biodiesel fueled stationary CI engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.051>
- Knothe, G., y Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36–59. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2016.08.001>
- Kowalewicz, A. (2005). Eco-diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester and ethanol. Part 1: Efficiency and emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 219(5), 715–723. <https://doi.org/10.1243/095440705X28295>
- Lapinskienė, A., Martinkus, P., y Rėbždaitė, V. (2006). Eco-toxicological studies of diesel and biodiesel fuels in aerated soil. *Environmental Pollution*, 142(3), 432–437. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2005.10.023>
- Leme, D. M., Grummt, T., Heinze, R., Sehr, A., Renz, S., Reinel, S., ... Marin-Morales, M. A. (2012). An overview of biodiesel soil pollution: Data based on cytotoxicity and genotoxicity assessments. *Journal of Hazardous Materials*, 199–200, 343–349. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2011.11.026>
- Llanes Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J. C., Salazar Alvear, P., y Medrano Barboza, J. (2017). Producción e impacto del biodiesel: una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2(7), 59–76.
- Lozano-Rivas, W. A. (2011). Determinación del número mínimo de observaciones en investigación, obviando las estimaciones de la varianza de datos. *Revista de Didáctica Ambiental [En Línea]*, 10, 54–61.
- Luna, D., Calero, J., Sancho, E. D., Luna, C., Posadillo, A., Bautista, F. M., ... Verdugo, C. (2014). Technological challenges for the production of biodiesel in arid lands. *Journal of Arid Environments*, 102, 127–138. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2013.11.014>

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Mafla Yépez, C. N., Imbaquingo Navarrete, R., Melo Obando, J., Benavides Cevallos, I.,

Hernández Rueda, E., Mafla Yépez, C., ... Hernández Rueda, E. (2018). Cuantificación de la opacidad en motores electrónicos diésel usando diésel y biodiésel. *Ingenius*, (19), 102. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.10>

Misra, R. D., y Murthy, M. S. (2011). Blending of additives with biodiesels to improve the cold flow properties, combustion and emission performance in a compression ignition engine—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2413–2422. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.02.023>

Ogunkunle, O., y Ahmed, N. A. (2019a). Performance evaluation of a diesel engine using blends of optimized yields of sand apple (*Parinari polyandra*) oil biodiesel. *Renewable Energy*, 1320–1331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>

Ogunkunle, O., y Ahmed, N. A. (2019b, November 1). A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.028>

Onukwuli, D. O., Emembolu, L. N., Ude, C. N., Aliozo, S. O., y Menkiti, M. C. (2017). Optimization of biodiesel production from refined cotton seed oil and its characterization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 103–110. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2016.02.001>

Pasqualino, J. C., Montané, D., y Salvadó, J. (2006). Synergic effects of biodiesel in the biodegradability of fossil-derived fuels. *Biomass and Bioenergy*, 30(10), 874–879. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2006.03.002>

Qi, D. H., Geng, L. M., Chen, H., Bian, Y. Z., Liu, J., y Ren, X. C. (2009). Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil. *Renewable Energy*, 34(12), 2706–2713. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.05.004>

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Rajkumar, S., y Thangaraja, J. (2019). Effect of biodiesel, biodiesel binary blends,

hydrogenated biodiesel and injection parameters on NO_x and soot emissions in a turbocharged diesel engine. *Fuel*, 240, 101–118.

<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.11.141>

Rocha-Hoyos, J. C., Llanes-Cedeño, E. A., Celi-Ortega, S. F., Peralta-Zurita, D. C. (2019).

Efecto de la Adición de Biodiésel en el Rendimiento y la Opacidad de un Motor Diésel.

Información Tecnológica, 30(3), 137–146. [https://doi.org/10.4067/S0718-](https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300137)

[07642019000300137](https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300137)

Saleh, J., Dubé, M. A., y Tremblay, A. Y. (2011). Separation of glycerol from FAME using

ceramic membranes. *Fuel Processing Technology*, 92(7), 1305–1310.

<https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2011.02.005>

Semwal, S., Arora, A. K., Badoni, R. P., y Tuli, D. K. (2011). Biodiesel production using

heterogeneous catalysts. *Bioresource Technology*, 102(3), 2151–2161.

<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.10.080>

Senthilkumar, S., Sivakumar, G., y Manoharan, S. (2015). Investigation of palm methyl-ester

bio-diesel with additive on performance and emission characteristics of a diesel engine

under 8-mode testing cycle. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 423–428.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.019>

Shahir, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Imran, A., y Ashraf, A. M. (2015).

Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a

fuel in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 62–78.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.049>

Sinha, D., y Murugavelh, S. (2016). Biodiesel production from waste cotton seed oil using

low cost catalyst: Engine performance and emission characteristics. *Perspectives in*

Science, 8, 237–240. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.038>

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N. N., Abul Kalam, M., Badruddin, I. A., Banapurmath, N.

R., y Akram, N. (2018, December 15). The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: A comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics. *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.019>

Tamilselvan, P., Nallusamy, N., y Rajkumar, S. (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1134–1159.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.176>

Vamag. (2017). *Manual de operaciones y mantenimiento*. Italia.

Villalobos, J. (2010). Eficiencia energética en el transporte de carga por carretera.

Villalobos, J., y Wilmsmeier, G. (2016). Estrategias y herramientas para la eficiencia energética y la sostenibilidad del transporte de carga por carretera.

Xue, J., Grift, T. E., y Hansen, A. C. (2011). Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1098–1116.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.016>

Yasin, M. H. M., Paruka, P., Mamat, R., Yusop, A. F., Najafi, G., y Alias, A. (2015). Effect of Low Proportion Palm Biodiesel Blend on Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine. In *Energy Procedia* (Vol. 75, pp. 92–98). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.145>

Živković, S. B., Veljković, M. V., Banković-Ilić, I. B., Krstić, I. M., Konstantinović, S. S., Ilić, S. B., ... Veljković, V. B. (2017). Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 222–247.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.048>

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE ENCENDIDO A COMPRESIÓN (MEC)”

Živković, S., y Veljković, M. (2018). Environmental impacts the of production and use of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1), 191–199.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0649-z>